

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Lauksaimniecības Enerģētikas institūts

Mg.sc.ing. **Vitālijs Osadčuks**

Autonomās kombinētās elektroapgādes vadības sistēmu modelēšana

Promocijas darba
KOPSAVILKUMS
Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

Modelling of autonomous hybrid power supply control systems

Promotion paper
SUMMARY
For acquiring Doctor's degree in Engineering sciences

Promocijas darba izstrādi līdzfinansējis
Eiropas Savienības Sociālais fonds



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

**Jelgava
2012**

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā.

Zinātniskais vadītājs:

Dr.sc.ing., asociētais profesors **Ainārs Galiņš**

Oficiālie recenzenti:

Dr.sc.ing. **Ēriks Kronbergs** – Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors

Dr.sc.ing. **Viesturs Bražis** – Rīgas Tehniskās universitātes asociētais profesors

Dr.sc.ing. **Agris Ņikitenko** – Rīgas Tehniskās universitātes docents

Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Lauksaimniecības nozares un Inženierzinātņu apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2012. gada 21. jūnijā, plkst. 10:00, Jelgavā, J. Čakstes bulv. 5, Tehniskajā fakultātē 429. auditorijā.

Ar promocijas darbu, pielikumu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā iela 2.

Atsauksmes sūtīt Promocijas padomes sekretāram, profesoram, Dr.sc.ing. Imantam Ziemelim, LLU Tehniskā fakultāte, J. Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV-3001.

Promocijas padomes priekšsēdētājs:

Dr.sc.ing., profesors **Juris Priekulis**

The research is carried out at Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, Institute of Agricultural Energetics.

Scientific advisor:

Dr.sc.ing., Associate Professor **Ainārs Galiņš**

Official reviewers:

Dr.sc.ing. **Ēriks Kronbergs** – Professor of Latvia University of Agriculture

Dr.sc.ing. **Viesturs Bražis** – Associate Professor of Riga Technical University

Dr.sc.ing. **Agris Ņikitenko** – Assistant Professor of Riga Technical University

The promotion paper will be defended in an open meeting of the Promotion Council of the sub-branch of Engineering Sciences of the branch of Agriculture at the Latvia University of Agriculture on June 21, 2012, at 10:00. Venue – Jelgava, J. Čakstes Blvd. 5, Faculty of Engineering, Room 429.

The promotion paper, annex and the summary are available at the Fundamental library of Latvia University of Agriculture, Liela str. 2, Jelgava.

References should be sent to the secretary of the Promotion Council, Professor, Dr.sc.ing. Imants Ziemelis. Address – Faculty of Engineering of Latvia University of Agriculture, 5 J.Čakstes Blvd., Jelgava, LV-3001.

Head of the Promotion Council:

Professor, Dr.sc.ing. **Juris Priekulis**

SATURS

Pētījumu aktualitāte	4
Pētījumu hipotēze, mērķis un uzdevumi	6
Zinātniskā darba aprobācija	6
1. Autonomās kombinētās elektroapgādes iekārtu un automatiskās vadības teorētiskie pētījumi	9
1.1. Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas ar centralizēto līdzstrāvas kopni	9
1.2. Modeļu kopas izstrādes metodika	10
2. Vadības sistēmas, izpildiekārtu, ģeneratoru un uzkrājēju modeļi	16
2.1. AVS objektu modelis	16
2.2. Galveno izpildiekārtu, ģeneratoru, uzkrājēju un slodžu imitāciju modeļi	17
3. Eksperimentālo datu un teorētisko modeļu salīdzināšana	19
3.1. Eksperimenti ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeli	19
3.2. Eksperimenti ar saules paneļa un akumulatoru uzlādes kontrollera autonomo sistēmu	23
4. Modeļu kopas aprobācija	25
Secinājumi	30

CONTENT

Background of the research	32
Hypothesis, aim and tasks of the research	34
Approbation of the scientific work	34
1. Theoretical studies of hybrid power supply equipment and control systems	37
1.1. Autonomous hybrid power systems with central DC bus	37
1.2. Methods of development of the model set	38
2. Models of control system, actuators, generating and accumulating equipment	41
2.1. Object model of the control system	41
2.2. Simulation models of main actuators, generators, accumulators and loads	42
3. Comparison of experimental data and theoretical models	43
3.1. Experiments with a physical model of the DC bus	44
3.2. Experiments with a solar charge controller and battery autonomous system	45
4. Approbation of the model set	47
Conclusions	49

PĒTĪJUMU AKTUALITĀTE

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). Saskaņā ar Eurostat datiem (Share of renewable..., 2011) Latvijā 2009. gadā aptuveni 34.3 % patērētās enerģijas tika iegūta no atjaunojamajiem resursiem, kas ir trešais 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). Viens no veidiem energoneatkarības paaugstināšanai ir lokāli pieejamo atjaunojamo resursu izmantošana. 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.

Nākotnes elektroapgādes tīkli ir orientēti uz dalītās ģenerēšanas sistēmām (DGS) un mikrotīkliem. Uzsvars tiek likts ne tikai uz centrālajām spēkstacijām, bet arī uz plašā teritorijā izvietotām mazas jaudas (dažādos avotos tiek minēts 1 – 1000 kW līdz 10 MW) spēkstacijām, kas darbojas tajā skaitā no vēja, saules, biomasas u.c. lokāli pieejamajiem atjaunojamās enerģijas avotiem (Bayod-Rujula, 2009). Viens no mikrotīklu attīstības virzieniem ir autonomās elektroapgādes sistēmas bez pastāvīga tīkla pieslēguma. Autonomā elektroapgāde tiek izmantota gadījumos, kad nav pieejams elektriskais tīkls, pieslēguma jauda ir nepietiekama un pieslēguma izbūve vai modernizācija nav ekonomiski pamatota. Ja ir ierobežota atjaunojamo resursu pieejamība (neregulārs vēja ātrums un saules starojums), kas ir raksturīgi Latvijas teritorijā, vairāki resursi tiek kombinēti vienā autonomā sistēmā. Nepārtrauktas elektroenerģijas piegādes nodrošināšanai autonomās sistēmās izmanto ķīmiskos akumulatoros, fosilo resursu ģeneratorus u.c. perspektīvas enerģijas ražošanas un uzkrāšanas iekārtas, piemēram, koncentrējošās fotoelektriskās saules stacijas, spararati, ūdeņraža iekārtas, superkondensatori u.c.

Ņemot vērā straujo atjaunojamās enerģētikas tehnoloģiju attīstību, īpaši saules bateriju, elektroķīmisko u.c. enerģijas uzkrāšanas veidu, kā arī spēka elektronikas pārveidotāju, autonomās elektroapgādes sistēmas kļūst par alternatīvu jauna elektriskā tīkla pieslēguma izbūvei mikro mēroga elektroenerģijas patērētājiem (orientējoties pēc Eiropas Parlamenta direktīvas 2004/8/EK klasifikācijas – ar maksimālo vienlaicīgo jaudu līdz 50 kW), piemēram, nelieli lauksaimniecības kompleksi, fermas, siltumnīcas, viensētas, tūrisma objekti u.c.

Atkarībā no lokāli pieejamiem resursiem un elektriskās slodzes grafika, autonomajos tīklos ir iespējams liels skaits dažādu iekārtu kombināciju gan funkcionāli, gan jaudas ziņā. 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 kombinētā elektroapgādes sistēmā, samazināt fosilo resursu ģeneratoru darbības laiku un nodrošināt nepārtrauktu elektroenerģijas padevi patērētājam.

Kombinēto elektroapgādes sistēmu un to automātiskās vadības sistēmu pētījumos plaši tiek lietotas modelēšana un datorsimulācija. Pētījumus var nosacīti iedalīt divās grupās: dinamiskie simulācijas modeļi pārējas procesu pētījumiem un statiski laikrindu modeļi kombinēto elektroapgādes sistēmu darbības simulācijai diennakts, sezonas un gada garumā.

Literatūrā tiek piedāvātas dažādas autonomās kombinētās elektroapgādes kompleksa un segmentu līmeņa vadības pieejas fosilo resursu ģeneratoru un enerģijas uzkrājēju izmantošanai mainīgas primāro resursu pieejamības un mainīgas slodzes apstākļos. Ir pieejamas kombinēto sistēmu modelēšanas un simulācijas vides, piemēram, HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) un Hybrid2, kurās realizēti tipveida augstākā līmeņa vadības algoritmi un stratēģijas. No otras puses zinātniskajā literatūrā tiek pētīti arī alternatīvi segmentu un kompleksa automatizācijas līmeņa vadības risinājumi, kuri izmanto informācijas un komunikācijas tehnoloģiju un mākslīgā intelekta elementus, piemēram, pieejamās atjaunojamo resursu ģeneratoru jaudas prognozēšana, izmantojot, meteoroloģisko informāciju, adaptīvā vadība, kas pielāgojas patēriņa jaudas profilam, izmantojot neironu tīklus, intelektuālo aģentu sistēmas u.c. Šo metožu realizēšanai ir nepieciešams salīdzinoši sarežģīt programmas kods, kas nav paredzēts pieejamās kombinēto elektroapgādes sistēmu simulācijas vidēs.

Iespējamais risinājums ir automātiskās vadības kontūra posmu modelēšana, t.i., savstarpēji tiek apvienoti virtuāli modeļi, piemēram, automātiskās vadības sistēmas (AVS) objekta modelis realizēts dinamiskās simulācijas vidē, bet kontrollera programmatiskais modelis ir atsevišķa programma. Līdzīgi izmanto arī AVS kontūra daļēju modelēšanu: atsevišķi vadības kontūra posmi, piemēram, kontrolleris vai sensors ir reālas iekārtas, bet pārējie – ar speciāliem vadības un/vai spēka signālu interfeisiem pievienoti datorā simulētie virtuālie modeļi. Jāatzīmē, ka zinātniskajā literatūrā šī pieeja nav plaši apskatīta tieši autonomās kombinētās elektroapgādes segmentu un kompleksa līmeņa vadības algoritmu un stratēģiju pētījumos.

PĒTĪJUMU HIPOTĒZE, MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Zinātniskā darba hipotēze: izmantojot modelēšanas pieeju, kur controlleris 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 modelētā vidē testēto un novērtēto AVS programmatūru bez būtiskām izmaiņām izmantot autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmu 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 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.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

Pētījumi veikti laika posmā no 2007. gada līdz 2012. gadam Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības Enerģētikas institūtā.

Dotajā laika posmā publicēti 8 zinātniskie raksti, no kuriem 6 ir ievietoti vispārārtītos recenzējamajos izdevumos. Par pētījumu rezultātiem ziņots 6 starptautiskās zinātniskās konferencēs, kuras notika Latvijā, Grieķijā un Turcijā. Darba rezultāti izmantoti 2 zinātniskos projektos.

Publikācijas vispārārtzītos recenzējamos izdevumos

1. Osadčuks V., Galiņš A. (2007) Application of the object oriented approach in the research of autonomous power supply systems. **In:** *Engineering 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., Ermuja A., Arhipova I., Smits I., Osadčuks 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:** *Engineering 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 5th 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 5th 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

Seminārs “Gudro māju tehnoloģijas: apzinātās iespējas”. LU Matemātikas un Informātikas Institutā, 2008. gada 16. decembrī. Semināra organizatori: Ventpils augstskolas inženierpētniecības centrs, LLU TF Lauksaimniecības Enerģētikas institūts un SIA “Mikro dators”. Ziņojuma nosaukums: “Apgaismes vadība ar M-bus”.

Dalība ligumdarbos

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

Pētījums veikts ar Eiropas Sociālā Fonda apakšaktivitātes “Atbalsts doktora studiju programmu īstenošanai” projekta “Atbalsts LLU doktora studiju īstenošanai” mērķfinansējuma atbalstu.

Vienošanās Nr. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017.

1. AUTONOMĀS KOMBINĒTĀS ELEKTROAPGĀDES IEKĀRTU UN AUTOMĀTISKĀS VADĪBAS TEORĒTISKIE PĒTĪJUMI

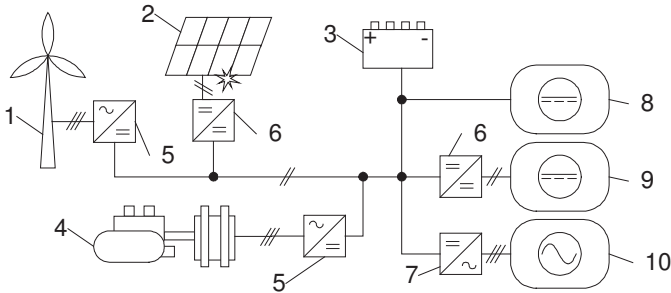
Pētījuma objekts ir mikro mēroga autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas, kurām jādarbojas mainīgas slodzes un primāro energoresursu pieejamības apstākļos. Mikro mēroga sistēmās ar maksimālās jaudas ierobežojumu līdz 50 kW ir iespējams izmantot zemsprieguma līdzstrāvas kopni, kuras galvenās priekšrocības salīdzinājumā ar maiņstrāvas kopni ir vienkāršota elektroenerģijas avotu ieslēgšana, galvenais regulējamais parametrs ir tikai kopnes spriegums un iespēja akumulatorus ieslēgt kopnē tieši. Tiek prognozēts, ka, pateicoties spēka elektronikas attīstībai, līdzstrāvas kopnes izmantošana DGS realizācijā tuvākajos gados paplašināsies (Manwell et.al., 2006). Centralizētās līdzstrāvas kopnes arhitektūras piemēroftiba mikro mēroga kombinētām elektroapgādes sistēmām ir pamatota vairāku autoru darbos (Noroozian et.al., 2009, Paska et.al., 2009, Zhou and François, 2011). Iepriekš minētās līdzstrāvas kopnes īpaftības ļauj hipotētiski uzskatīt, ka līdzstrāvas kopne, salīdzinot ar maiņstrāvas kopni, ir labāk piemērota autonomu un mikroftiklu veida elektroapgādes sistēmu risinājumiem. Īpafti aktuāli tas ir izteikti periodiskam lauku saimniecftbu diennakts elektriskās slodzes profilam, kuru ietekmē tādi patērētāji kā slaukšanas iekārtas, piena dzesētāji, kftsmeslu transportieri u.c. un pie neregulāras atjaunojamo resursu pieejamftbas rodas nepiecieftamftba periodiski darbināt papildus ģeneratorus.

1.1. Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas ar centralizēto līdzstrāvas kopni

Vispārftga centralizētās līdzstrāvas kopnes autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas blokshēma ir redzama 1. att. Spriegums kopnē tiek noturēts, regulējot pieejamo strāvu no primārajiem enerģijas avotiem: nevienmērftgi pieejamajiem atjaunojamajiem (saule, vējš), pastāvftgi pieejamajiem atjaunojamajiem un fosilajiem resursiem ar enerģijas daudzuma ierobežojumu (dftzeldegviela, biogāze), kā arī uzkrājftjiem (spararats, degvielas elements, superkondensatoru baterija). Papildus regulējofto efektu var panākt ieslēdzot vai atslēdzot elektrisko slodzi vai veicot enerģijas uzkrāšanu. Sprieguma stabilizēftšanai un augstas frekvences svārstftbu kompensēftšanai tiek izmantoti kopnē tiefti slēgti akumulatori. Šādai sistēmai ir komplicēta vairāklftmeņu automātiskā vadftba, kura promocijas darba ietvaros ir strukturēta pēc ražošanas automatizācijs lftmeņiem (Кругляк, 2002).

Segmentu automatizācijs lftmeņa AVS objekts ir līdzstrāvas kopne, kurā nepiecieftams noturēt uzdoto spriegumu. Izpildiekārtas ir līdzstrāvas kopnē paralēli slēgti spēka interfeisi. Šajā lftmenft tiek nodroftināta līdzstrāvas kopnes

vadība un enerģijas plūsmas pārdale, iestatot spēka interfeisu darba režīmus (ieslēgšana/atslēgšana, izejas sprieguma un strāvas regulējošie signāli). Spēka interfeisu izejas strāvas un sprieguma vērtības un pārējo iekārtu (ģeneratoru, enerģijas uzkrājēju) automātisko vadību nodrošina lokālās vadības sistēmas, kuras kopumā veido iekārtu automatizācijas līmeni.



1. att. Autonomas kombinētās elektroapgādes sistēmas blokskāme

1 – vēja ģenerators; 2 – fotoelektriskais ģenerators; 3 – akumulators; 4 – ierobežota enerģijas resursa ģenerators; 5 – regulējams taisngriezis; 6 – līdzstrāvas pārveidotājs; 7 – invertors; 8 – kopnei tieši pieslēgts līdzstrāvas patērētāju tīkls; 9 – līdzstrāvas patērētāju tīkls; 10 – maiņstrāvas patērētāju tīkls

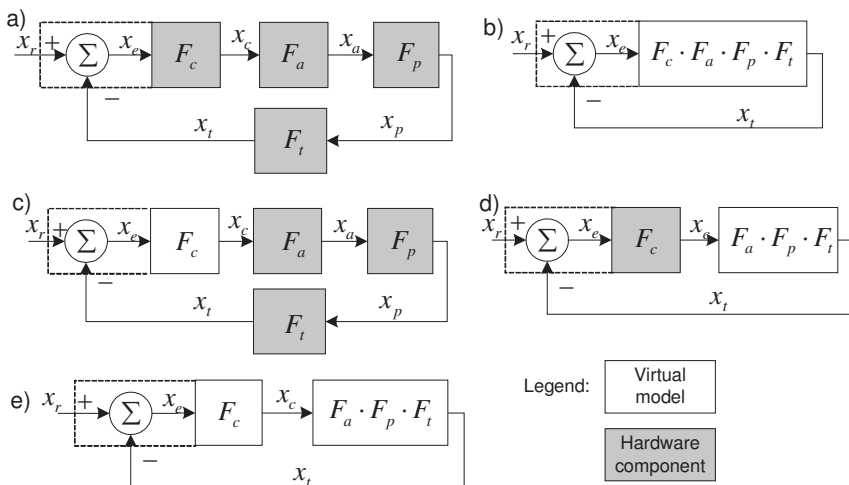
Fig. 1. Block diagram of autonomous hybrid power supply system

1 – wind generator; 2 – photovoltaic generator; 3 – battery; 4 – generator with a limited energy resource; 5 – rectifier; 6 – DC converter; 7 – inverter; 8 – DC consumer grid connected directly to the bus; 9 – DC consumer grid; 10 – AC consumer grid

Kompleksa automatizācijas līmenī ir augstākā līmeņa vadības un datu uzkrāšanas sistēmas (SCADA). Šis līmenis var aptvert vienotā sistēmā vairākas elektriskās dalītās ģenerēšanas sistēmas, kā arī nodrošināt ar enerģētiku nesaistītu AVS objektu augstākā līmeņa vadību, piemēram, “gudrās mājas” elementu vadību.

1.2. Modeļu kopas izstrādes metodika

Kompleksa un segmentu līmeņu vadības algoritmu un stratēģiju novērtēšanai ir izmantota atsevišķu vadības kontūra daļu modelēšanas pieeja, kur controlleris ir nodalīta reāla iekārta vai atsevišķa datorprogramma, bet AVS objekts ir virtuāls vai fizikāls modelis. Kā piemērs 2. att. (a) dota vienkārša slēgta atgriezeniskās saites sistēma viena parametra regulēšanai. Attēlā ietonētie bloki ir aparātiskas komponentes, neitonētie – virtuālie modeļi. Jāatzīmē, ka apskatītā pieeja tiek izmantota arī kompleksu sistēmu modelēšanā ar vairākiem regulējamiem parametriem.



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

pārvades funkcijas: F_c – kontrollerim, F_a – izpildiekārtai, F_p – objektam, F_t – sensoram; signāli: x_r – regulējošais, x_c – kontrollera vadības, x_a – vadības iedarbes, x_p – objekta stāvokļa, x_t – sensora, x_e – regulēšanas kļūdas

Fig. 2. Control loop with feedback (a), its simulation model (b), power HIL model (c), controller HIL model (d) and SIL model (e)

transfer functions of controller – F_c , actuator – F_a , plant – F_p , transducer – F_t ; control reference signal – x_r , control signal – x_c , control action – x_a , plant state – x_p , transducer signal – x_t , control error signal – x_e

Atsevišķu vadības kontūra daļu modelēšanas un simulēšanas pieejā tiek izšķirtas vairākas metodes:

- MIL (*Model In The Loop*) (Plummer, 2006), kas būtībā ir klasisks dinamiskais sistēmas un tās automātiskās vadības kontrollera modelis izstrādāts vienotā vidē, piemēram, Matlab Simulink (skat. 2. att. (b));
- 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); atkarībā no darba mērķa (vadības sistēmas izstrāde un testēšana, automātiskās vadības objektu, izpildiekārtu un sensoru darbības novērtēšana pie dažādiem vadības algoritmiem un režīmiem) sīkāk tiek iedalīta spēka HIL un kontrollera HIL 2. att. (c) un (d) attiecīgi;

- pilnībā programmatiska vadības kontūra pētīšanas metode SIL (*Software In The Loop*), kura paredz izpildiekārtas, objekta un sensora modeļus veidot dinamiskās simulācijas vidē, bet kontrolleri realizēt kā atsevišķu programmu, piemēram, atsevišķā izpildatnē kompilētā no C valodas koda (Youn et.al., 2007, Mauri, 2009), 2. att. (e).

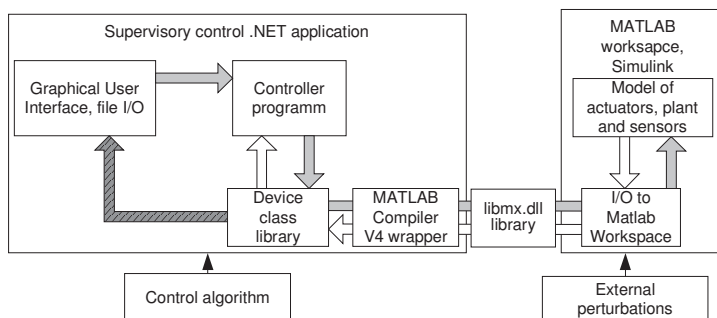
Apskatītās HIL un SIL metodes tiek izmantotas vadības sistēmu izstrādē un testēšanā, gadījumos, ja automātiskās vadības objekts ir komplicēta, konfigurācijas ziņā unikāla vai dārga sistēma, kuras darbināšana testa nolūkos nav iespējama, ir bīstama, resursietilpīga vai arī vēl atrodas izstrādes stadijā un nav pieejama (Ledin, 1999, Gomez, 2001). Atjaunojamās enerģētikas iekārtu un DGS, tajā skaitā kombinēto resursu sistēmu pētniecībā un izstrādē HIL un SIL metodes ir lietotas jau iepriekš: atsevišķu ģenerējošo iekārtu un tīkla pieslēguma simulācijai, spēka interfeisu un to iekārtu līmeņa vadības sistēmu pētījumiem, jaudas stendi elektrisko mašīnu pētīšanai u.c.

Autonomās kombinētās elektroapgādes sistēma, kas kā enerģijas avotus vienlaicīgi izmanto vairāku veidu atjaunojamo resursu veidus, pēc būtības ir komplicēta sistēma ar stohastiskām perturbācijām. Atkarībā no lokāli pieejamiem resursiem un slodzes profila ir iespējams liels skaits ģenerējošā, uzkrājošā un spēka interfeisa iekārtu kombināciju. Tas atbilst literatūrā apskatītajiem SIL un HIL izmantošanas gadījumiem. Tomēr jāatzīmē, ka literatūrā neparādās plaša informācija par šo metožu izmantošanu kombinētās elektroapgādes vadības pētījumos segmentu un kompleksa automatizācijas līmenī.

Lai parādītu apskatītās pieejas izmantošanas piemērotību dažādu enerģijas plūsmas vadības algoritmu stratēģiju novērtēšanai un realizēšanai vadības iekārtas programmatūrā, izmantotas SIL un spēka HIL metodes. Autora piedāvātās AVS un imitācijas modeļu kopas elementu blokshēma SIL režīmam ir redzama 3. att.

AVS kontrollera programmatiskā modeļa izstrādei ir lietota Microsoft .NET vide, kas nodrošina iespēju koda atkārtotai izmantošanai vairākās operētājsistēmās un pieļauj programmatūras izstrādi, izmantojot modeļu vadītu jeb modeļbāzētu arhitektūru (MDA – *Model Driven Architecture*). Līdz ar to SIL režīmā testēto vadības programmu ar minimālām izmaiņām ir iespējams lietot gatavā kontrollera risinājumā (personālajā, industriālajā datorā, iegultajā sistēmā utt.). Vadības programmas sasaistei ar reālām iekārtām un to imitāciju modeļiem tika izstrādāta galveno autonomās kombinētās elektroapgādes izpildiekārtu, ģeneratoru un uzkrājēju klašu bibliotēka (skat. 2.1. nodaļu). Kombinētās elektroapgādes sistēmas imitāciju modeļi izstrādāti Matlab Simulink vidē. Simulink modeļi aptver visas vadības kontūra komponentes, izņemot vadības bloku, un nodrošina sāsisti ar vadības programmu .NET vidē.

Informācijas apmaiņai starp vadības programmu un Matlab darba vidi 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 parametrus – ceļu uz Simulink modeli, simulācijas laika periodu un konfigurāciju, kā arī modeļa ieejas vērtības. Simulācijas rezultātu – laika, modeļa izejas signālu un inerciālo bloku stāvokļu vektorus – iegūst caur Matlab vides mainīgajiem.



3. att. Simulācijas, izmantojot SIL metodi

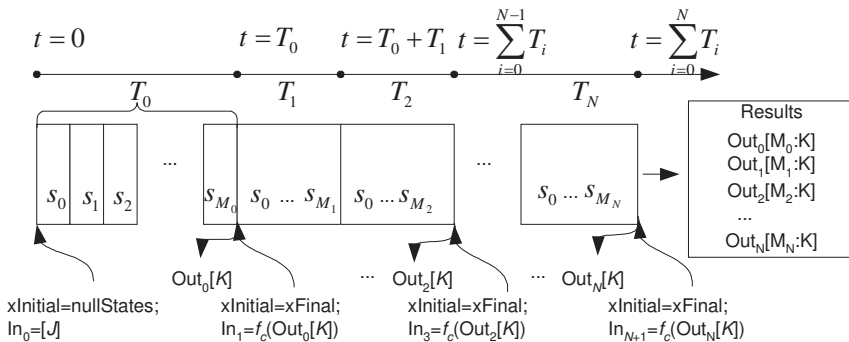
← – vadības un perturbāciju signāli; ← – atgriezeniskās saites signāli;
 ← – simulācijas rezultāts; ← – simulācijas ieejas

Fig. 3. Simulation using SIL method

← – control and perturbation signals; ← – feedback signals;
 ← – result of the simulation; ← – inputs of the simulation

Modeļa simulācija tiek veikta pa periodiem. Vadības programma nolasa rezultātus, kas reprezentē sensoru rādījumus, katra perioda beigās un padod regulējošo iedarbi uz modeli nākamā perioda sākumā. Simulācijas process detalizēti uz kopējā simulācijas laika t ass parādīts 4. att. Simulācijas periods T Simulink vidē atkarībā no izvēlētā aprēķina 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 nolāsītas 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. 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.

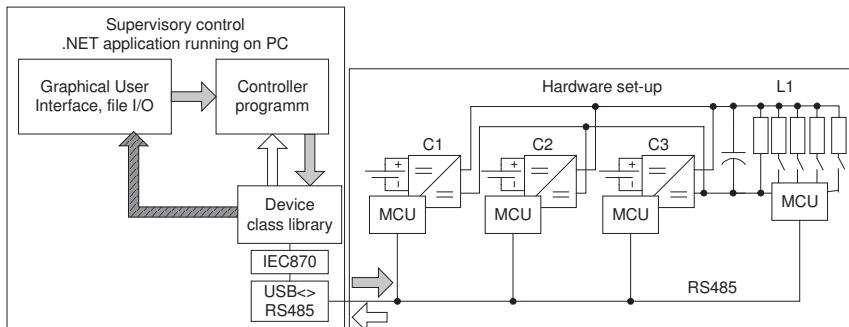


4. att. SIL simulācijas process uz simulācijas laika ass

Fig. 4. Process of SIL simulation on simulation time axis

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 pēģināta tikai kontrollera funkcionalitāte. SIL simulācijas metode, ievērtējot kontrollera programmatūras koda reāllaika izpildes īpašības sīkāk ir apskatīta (Youn et.al., 2007).

Segmentu līmeņa AVS programmatūras modeļa darbība spēka HIL simulācijas režīmā demonstrēta, izmantojot līdzstrāvas kopnes un spēka interfeisu (pazeminošo līdzstrāvas pārveidotāju) fizikālo modeli (skat. 5. att.).



5. att. Simulācija, izmantojot spēka HIL metodi

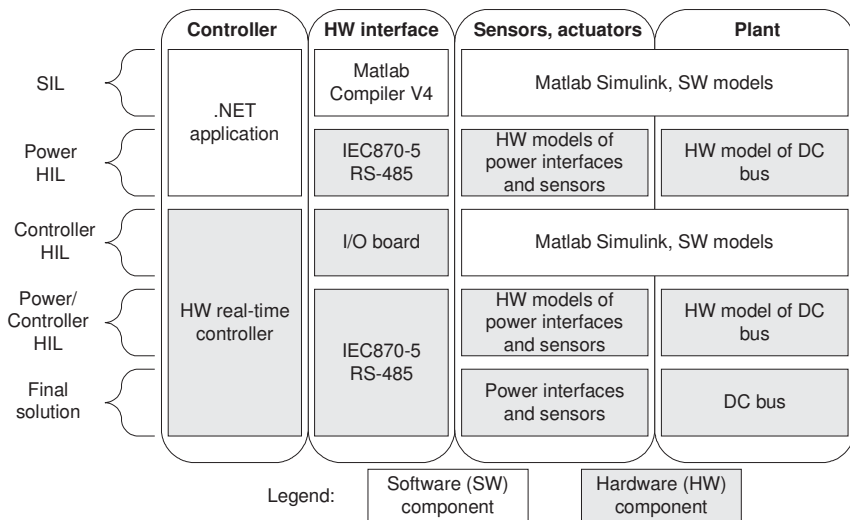
- ← - vadības un perturbāciju signāli; ← - atgriezeniskās saites signāli;
- ← - simulācijas rezultāts

Fig. 5. Simulation using HIL method

- ← - control and perturbation signals; ← - feedback signals;
- ← - result of the simulation

Fizikālā modeļa vadībai izmantota tā pati iekārtu klašu bibliotēka un vadības programma, kas SIL režīmā. Atšķiras tikai aparatūras interfeisu realizējošās klases. Ja SIL gadījumā tā ir ietvarklase sasaistei ar Matlab vidi, tad fizikālā modeļa vadība veikta caur ciparu datu apmaiņas tīklu (RS485 fizikālajā līmenī un IEC870-5 protokols datu posma līmenī). Sīkāk eksperimentālais stenda darbība apskatīta 3.1. nodaļā.

Kopējā autora piedāvātā vadības sistēmu modelēšanas struktūra parādīta 6. att. Aparātiskās un programmātiskās 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; automātiskās vadības objekts.



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

Fig. 6. Use of SIL and HIL methods in the studies of operation of central DC bus hybrid power supply and its control system in different stages of development

Darba ietvaros bez SIL un spēka HIL simulācijas ir pētīta reāla sistēma, kas sastāv no akumulatora, slodzes, saules baterijas un uzlādes kontrollera. Eksperimentāli iegūtie dati salīdzināti ar līdzstrāvas kopnes, spēka interfeisu, akumulatora un saules baterijas modeļu simulācijas datiem. Modeļu kopa aprobēta simulācijā SIL režīmā kompleksa un segmentu līmeņa autonomas kombinētas elektroapgādes sistēmas vadības algoritmu novērtēšanai. Simulācijas ieejās izmantoti dati par lauksaimniecības objekta (liellopu fermas)

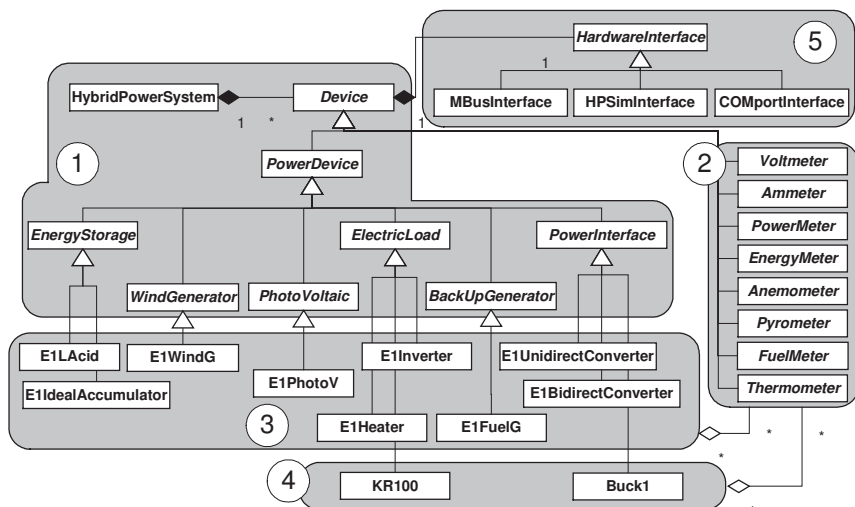
elektroenerģijas patērētājiem un meteoroloģisko informāciju atjaunojamo resursu ģeneratoru pieejamās jaudas noteikšanai.

2. VADĪBAS SISTĒMAS, IZPILDIEKĀRTU, ĢENERATORU UN UZKRĀJĒJU MODEĻI

Darba ietvaros ir sīkāk pētīta autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmās biežāk lietoto iekārtu darbība, izstrādāti to imitāciju un objektu modeļi izmantošanai AVS programmatūrā. Visas iekārtas, izņemot akumulatoru, ir pieslēdzamas centrālajai kopnei tikai caur spēka interfeisiem, tāpēc modeļu vienkāršošanai un simulācijas paātrināšanai nav papildus modelēti elektriskie pārejas procesi ģenerējošajās un uzkrājošajās iekārtās.

2.1. AVS objektu modelis

AVS programmatūras realizācijā tika izmantota modeļu vadītā arhitektūra un objektorientētā pieeja, kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu (izpildiekārtas, sensori, komunikācijas iekārtas) vadībai nepieciešamās metodes un dati tika apvienoti klasēs (skat. 7. att.).



7. att. Kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu semantiskās tīkls

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

Fig. 7. Semantic network of hybrid power system equipment

1 – classes of hybrid power system; 2 – classes of sensors; 3 – classes of simulation models of the equipment; 4 – classes of physical devices used in the study; 5 – classes for the implementation of hardware interface

Objektorientētā pieeja un MDA kombinēto elektroapgādes sistēmu modelēšanai un vadības programmatūras izstrādē ir lietota jau iepriekš (Zhu and Lubkeman, 1997, Agostini et.al., 2007). Šajā darbā tipveida atjaunojamo resursu ģenerējošo un uzkrājošo iekārtu klašu struktūra tika papildināta ar iekārtu lokālo kontrolleri (pēc Коуд и.др., 1999) un HIL un SIL simulācijas metožu realizācijai nepieciešamajām klasēm.

Iekārtu klasifikācijas pamatā ir abstrakta klase “Device”. Lai nodrošinātu unificētu datu apmaiņas mehānismu ar AVS kontūra iekārtām vai to imitāciju modeļiem, “Device” satur aparatūras interfeisu veidojošo abstrakto klasi “HardwareInterface”. To paplašina klases “HPSimInterface”, “COMportInterface” un “MbusInterface”, kuras savukārt nodrošina pieeju imitāciju modeļiem, fizikālajiem modeļiem un reālām iekārtām SIL un HIL režīmos (5. grupa 7. att.). Klasē “Device” iekļautas arī metodes un īpašības, kuri ir attiecināmi uz visām iekārtām: ieslēgšana, izslēgšana, identifikators elektriskajā shēmā, ražotāja modelis u.c.

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.

“Device” paplašina klases “PowerDevice” (1. grupa), kas ir visu spēka izpildiekārtu vispārinājums, un dažādu veidu sensori (2. grupa). “PowerDevice” savukārt paplašina 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 “PowerDevice” iekārtu grupu klases paplašina divu grupu klases. Klases iekārtu imitāciju modeļiem ir 3. grupā, bet 4. grupā – klases līdzstrāvas kopnes fizikālā modeļa iekārtām.

2.2. Galveno izpildiekārtu, ģeneratoru, uzkrājēju un slodžu imitāciju modeļi

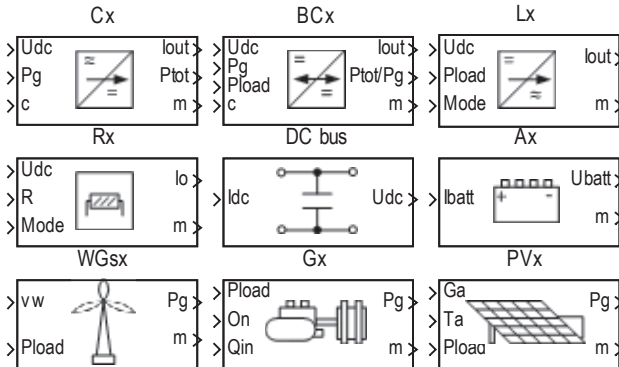
Tā kā pētījumā ir paredzēts modelēt kombinētās elektroapgādes sistēmas darbību dažādām līdzstrāvas kopnes konfigurācijām, tad kopējais sistēmas modelis tika sadalīts atsevišķās komponentēs: sprieguma un strāvas avoti (spēka interfeisi), ģeneratori, patērētāji un līdzstrāvas kopne. Izstrādātā Simulink bloku bibliotēka parādīta 8. att. Līdzstrāvas kopne modelēta kā elektriskais kontūrs ar paralēli slēgtiem avotiem un patērētājiem, kopnes kapacitāte ir konstants lielums, vadītāju pretestība un induktivitāte nav ņemta

vērā. Galvenais līdzstrāvas kopnes regulējams 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):

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

kur U_{dc} – līdzstrāvas kopnes spriegums;
 C_{dc} – līdzstrāvas kopnes kapacitāte;
 I_{Gi} – līdzstrāvas avotu strāvas;
 I_{Li} – slodžu strāvas.

Elektroenerģijas ģeneratori, uzkrājēji un maiņstrāvas slodzes tiek pieslēgtas kopnei caur spēka interfeisiem: līdzstrāvas pārveidotājiem, regulējamiem taisngriežiem, invertoriem u.c. Spēka interfeisi var darboties kopnē kā konstanta sprieguma vai konstantas strāvas avoti, kā arī kā konstantas strāvas, pretestības vai jaudas patērētāji. Sprieguma un strāvas regulējošos signālus ģenerē segmentu līmeņa vadības programma, tādējādi vadot enerģijas plūsmu uz patērētāju no atsevišķiem enerģijas avotiem un uzkrājējiem.



8. att. **Autonomās kombinētās elektroapgādes iekārtu Simulink bloku bibliotēka**

Cx – vienvirziena darbības spēka interfeiss; BCx – divvirzietu darbības spēka interfeiss;
Lx – konstantas jaudas slodze; Rx – konstantas pretestības slodze; DC bus – līdzstrāvas kopne;
Ax – akumulators; WGsx – vēja ģenerators; Gx – iekšdedzes motora ģenerators;
PVx – fotoelektriskais ģenerators (saules baterija)

Fig. 8. Simulink block library of autonomous hybrid power system equipment

Cx – unidirectional power interface; BCx – bidirectional power interface;
Lx – constant power load; Rx – constant resistance load; DC bus – the direct current bus;
Ax – battery; WGsx – wind generator; Gx – combustion engine generator;
PVx – photovoltaic generator (solar cells battery)

Elektroenerģijas avotu pieslēgšanai izmantoto vienvirziena darbības spēka interfeisu ieejas signāli ir kopnes spriegums U_{dc} un no elektroenerģijas

avota pieejamā jauda P_g , bet izejā ir pozitīva kopnes strāva I_{out} un kopējā no avota patērētā jauda P_{load} (uz kopni pārvadītā jauda un zudumi pārveidotājā). Elektroenerģijas avotiem savukārt ir pieejamās jaudas izeja P_g un patērētās jaudas ieeja P_{load} savienojumam ar spēka interfeisu. Enerģijas avotu un spēka interfeisu savienošana ar jaudas signālu dod iespēju modelēt spēka interfeisu ar līdzstrāvas izeju un universālu ieeju, neatkarīgi no ģenerējošās iekārtas izejas parametriem, tādējādi ļaujot vienkāršot modeļa uzbūvi un paātrināt simulāciju. Darba ietvaros veidotajos ģenerējošo iekārtu modeļos tiek modelēta tikai statiski pieejamā jauda un nav pētīti elektriskie pārejas procesi.

Konstantas jaudas slodzes ieejā ir kopnes spriegums U_{dc} un signāls P_{load} , ar kura palīdzību var norādīt konstantas jaudas vērtību. Slodzes spēka interfeisa izeja I_{out} patērē kopnē strāvu, tāpēc tā ir negatīva. Līdzīgi ir organizēta konstantas pretestības slodzes darbība. Divvirzienu darbības spēka interfeisi paredzēti uzkrājēju ieslēgšanai kopnē un paredz gan pozitīvas izejas strāvas režīmu, gan negatīvu, patērējot uzdoto jaudu kopnē un lādējot pieslēgto uzkrājēju. Akumulatora un līdzstrāvas kopnes blokos attiecīgi ieejās I_{batt} un I_{dc} tiek padota visu avotu un slodžu strāvu summa un aprēķināts kopnes spriegums. Vienā līdzstrāvas kopnes slēgumā strāvu summēšanai un sprieguma U_{dc} aprēķinam var izmantot tikai vienu no šiem blokiem. Papildus kopnes signāliem attālināti vadāmo iekārtu blokiem ir realizēti vadības signālu vektors “c” un kontroles signālu vektors “m”, ar kuru palīdzību tiek realizēta datu apmaiņa ar .NET vides augstākā līmeņa vadības programmu.

Bez spēka interfeisiem un slodzēm tika izstrādāti modeļi svina-skābes akumulatoram, ottomotorā piedziņas ģeneratoram (ģenerators ar ierobežotu enerģijas resursu), fotoelektriskais ģenerators jeb saules baterija un vēja ģeneratoram. Visu modeļu precizitāte, izņemot vēja ģeneratoru, tika novērtēta, salīdzinot tos ar reālu iekārtu eksperimentāli iegūtiem datiem.

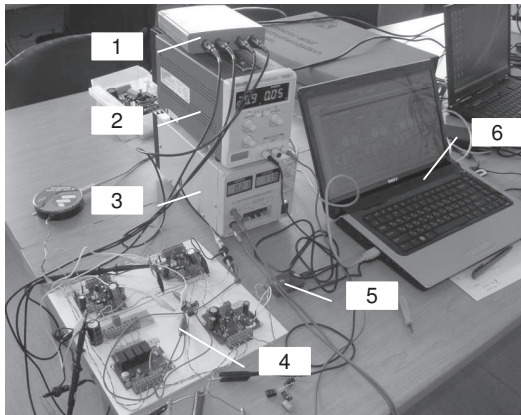
3. EKSPERIMENTĀLO DATU UN TEORĒTISKO MODEĻU SALĪDZINĀŠANA

Autonomās kombinētās elektroapgādes modeļu kopa tika eksperimentāli validēta divos soļos: ar fizikālo modeļi 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. Eksperimenti ar līdzstrāvas kopnes fizikālo modeļi

Mērķis eksperimentam ar fizikālo modeļi ir demonstrēt vienas un tās pašas augstākā līmeņa AVS programmas izmantošanas iespējas spēka HIL režīmā reāllaikā un salīdzināt rezultātus ar tās pašas konfigurācijas SIL modeļi.

Spēka HIL simulācija veikta ar līdzstrāvas kopnes un spēka interfeisa iekārtu fizikālajiem modeļiem, bet SIL – ar simulācijas modeļiem Simulink vidē. Fizikālais modelis ir mērogā samazināts reālas iekārtas modelis ar lokālu controlleri izejas parametru regulēšanai un datu apmaiņas interfeisu attālinātai vadībai un kontrolei. Segmentu līmeņa vadības iekārtas programmatūra realizēta, izmantojot 2.1. nodaļā apskatīto objektorientēto pieeju. Eksperimentā izmantoto iekārtu un datu plūsmas shēma dota 5. att. 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 vadības algoritmu. Šai vajadzībai tika praktiski izveidota eksperimentāla spriegumu pazeminošā līdzstrāvas pārveidotāja iekārta ar attālinātās vadības iespēju “Buck1”. Līdzstrāvas pārveidotājs var darboties strāvas vai sprieguma avota režīmā, izeja tiek regulēta ar PID controllera palīdzību. Eksperimentālais stends (skat. 9. att.) sastāv no 3 “Buck1” līdzstrāvas pārveidotājiem un pārslēdzamas 5 līmeņu rezistīvas slodzes, kuri slēgti vienotā kopnē ar ieslēgtu 2200 μ F kondensatoru. Slodzes līmeņi tiek pārslēgti ar releju palīdzību saslēdzot paralēli 100 Ω pretestības. Visas iekārtas ir saslēgtas vienā datu apmaiņas tīklā un savienotas ar vedējiekārtu – datoru kas darbojas kā augstākā līmeņa vadības controlleris.



9. att. Eksperimentālais stends

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

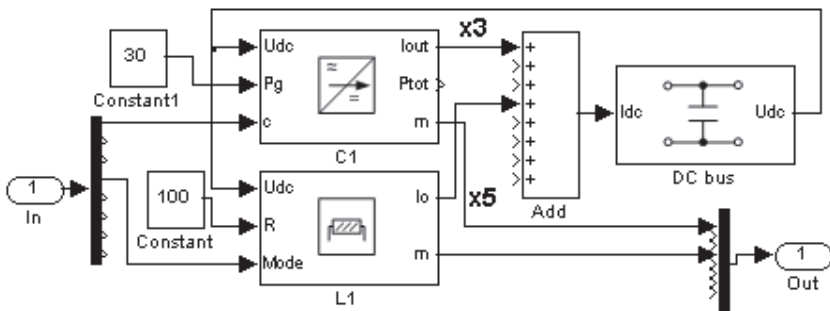
Fig. 9. Experimental setup

1 – oscilloscope; 2 – power supply for “Buck1” and load module controllers; 3 – power supply at the inputs of “Buck1”; 4 – DC bus; 5 – USB-RS485 converter; 6 – personal computer for supervisory control and data logging

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

Simulink modelis SIL režīmam savukārt veidots no idealizētajiem spēka interfeisiem (skat. 10. att.). Izmantota viena augstākā līmeņa AVS programma abiem simulācijas režīmiem, kura strādā divās paralēlās plūsmās: spēka interfeisu vadības algoritms un slodzes ieslēgšanas scenārija izpilde.

SIL un HIL simulācijas rezultāti tika salīdzināti, eksperimentāli, izpildot dažādus slodžu pieslēgšanas un regulēšanas scenārijus. Simulācijas rezultāts 11. att. parādīts sekojošam sistēmas darbības scenārijam. Sprieguma avots C1 notur kopnē pastāvīgu līdzspriegumu $U_{dc} = 8\text{ V}$, bet strāvas avots C3 sāk dot kopnē strāvu $I_{C3} = 150\text{ mA}$, ja sprieguma avota izejas strāva pieaug $I_{C1} \geq 170\text{ mA}$. Sākuma stāvoklī līdzstrāvas kopnē ir $100\ \Omega$ slodze, 4 soļos tā tiek palielināta līdz $20\ \Omega$, katrā solī pieslēdzot paralēli papildus $100\ \Omega$.

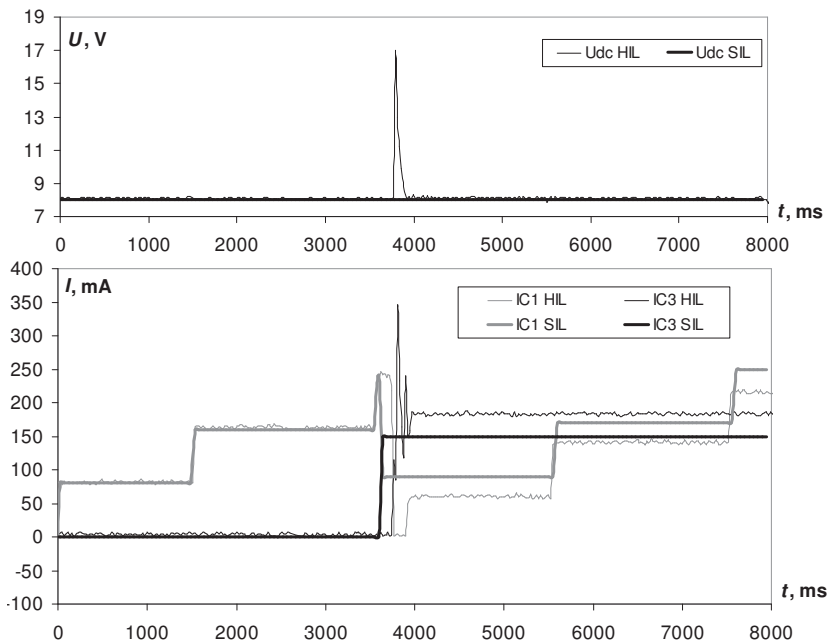


10. att. Eksperimentālā stenda Simulink modelis

Fig. 10. Simulink model of the experimental setup

Grafikā var redzēt, ka C1 pamatā stabili notur uzdoto kopnes spriegumu abos simulācijas režīmos, taču fizikālajā modelī parādās sprieguma lēcieni 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. Lēcieni nav novērojami 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 Ω 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 Ω 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 samazinās arī C1 strāva, kas nepieciešama kopnes sprieguma noturēšanai.



11. att. Fizikālā modeļa simulācijas rezultāti

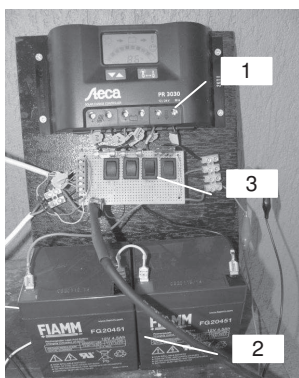
Fig. 11. Simulation results of the physical model

Jāatzīmē, ka apskatītā testēšanas vide, kurā vadības algoritms realizēts kā .NET vides programma, 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.

3.2. Eksperimenti ar saules paneļa un akumulatoru uzlādes kontrollera autonomo sistēmu

Autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas imitācijas modeļu eksperimentālā validācija ar reālām iekārtām veikta ar saules baterijas uzlādes kontrollera Steca PR3030, saules baterijas Kioto KPV 195 PE, divu slēgta tipa svina-skābes akumulatoru FIAMM FG20451 virknes slēgumā un divu slodzes rezistoru masīvu palīdzību. Eksperimentālais stends (kontrolleris un akumulatori) parādīts 12. att. Izmantota tipveida PR3030 slēguma shēma ar slodzi pieslēgtu tieši pie akumulatora spailēm. Ar stenda palīdzību iespējams uzņemt saules baterijas strāvu I_{PV} un spriegumu U_{PV} , akumulatoru strāvu I_{batt} un spriegumu U_{batt} , akumulatoriem tieši pieslēgtās slodzes strāvu I_{load} un apgaismojuma līmeni G_s .



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

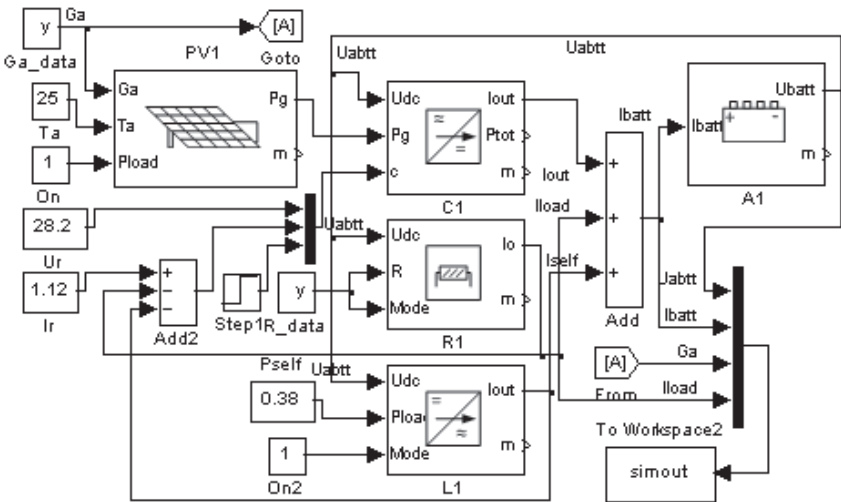
1 – uzlādes kontrolleris Steca PR3030; 2 – slēgta tipa svina-skābes akumulatori FIAMM FG20451; 3 – sadales un mērpārveidotāju plāksnīte

Fig. 12. Experimental setup of solar charge controller and batteries

1 – solar charge controller Steca PR3030; 2 – sealed lead-acid batteries FIAMM FG20451; 3 – distribution and transducer board

Eksperimentālie dati tika uzņemti atšķirīgiem slodžu un saules starojuma scenārijiem. Eksperimenti veikti Jelgavas novadā laikā no 2011. gada 3. līdz 23. augustam. Rezultāti tika salīdzināti ar darba ietvaros izstrādāto imitāciju modeļu kopu, ekvivalentais slēgums dots 13. att. Modelis sastāv no saules baterijas PV1, spēka interfeisa C1, slodzes R1, kopnes akumulatora A1

un papildus konstantas jaudas slodzes L1 kontrollera PR3030 pašpatēriņa imitēšanai. Modeļa ieejās ir divas ārējo datu laikrindas: saules elektromagnētiskais starojums (bloks “Ga_data”) un slodzes pretestība (bloks “R_data”). Slodzes dati katrā laika punktā tika aprēķināti no eksperimentāli uzņemtajām U_{batt} un I_{load} līknēm. 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 blokā “Add2” kā summa no PR3030 pašpatēriņa, slodzes (strāvas ir negatīvas, tāpēc summatorā tiek atņemtas) un pieļaujamās akumulatora uzlādes strāvas (1.12 A). Pirms katra mēģinājuma akumulatori tika uzlādēti līdz 26 ± 0.2 V (EDS).

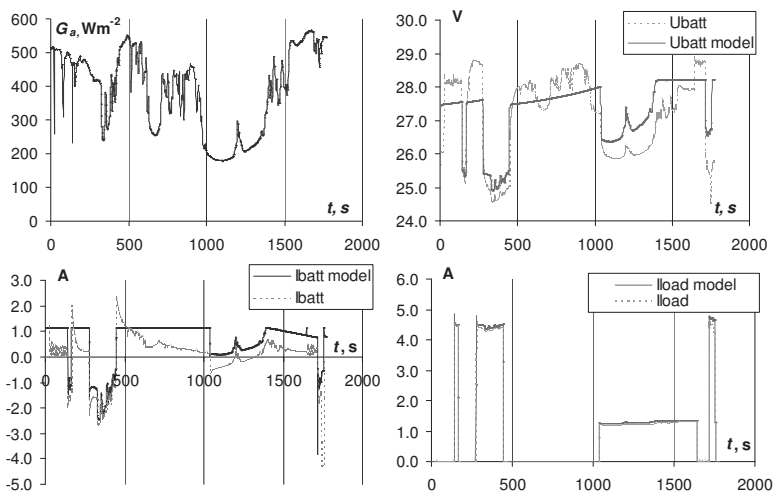


13. att. Uzlādes kontrollera PR3030, saules baterijas, akumulatora un slodzes ekvivalentā modeļa shēma

Fig. 13. Equivalent model of solar charge controller, photovoltaic module, battery and load

Mēģinājums 14. 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.

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



14. att. Eksperimentāli uzņemtie un modelētie sistēmas mainīgie

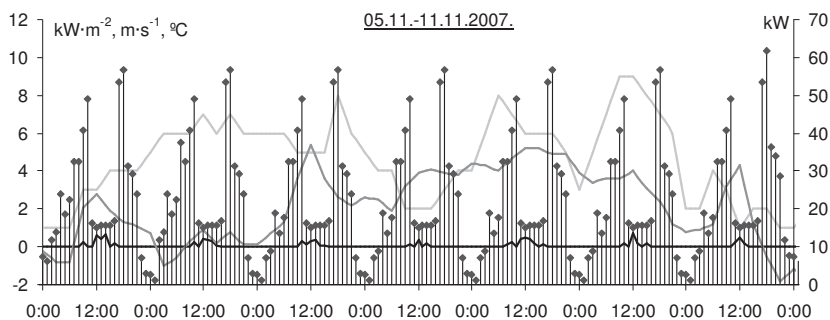
Fig. 14. Experimental and modelled variables of the system

Lielāka modeļa kļūda bija novērojama akumulatora strāvai pie atslēgtas slodzes – 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, turpretī modelētā spēka interfeisa izeja darbojas sprieguma vai strāvas avota režīmā. Strāvas kļūda samazinās, kad slodze ir ieslēgta. Kopumā modelētās slodzes strāvas kvadrātiskā kļūda nevienā mēģinājumā vidēji nepārsniedza 0.034 A, t.i. 2.9 % no teorētiskās vērtības pie akumulatoru nominālā sprieguma 24 V un slodzes pakāpes 21 Ω un 0.8 % pie 24 V un 7 Ω slodzes pakāpes.

4. MODEĻU KOPAS APROBĀCIJA

Darba ietvaros izstrādātās modeļu kopas aprobācija tika veikta, modelējot un simulējot liellopu fermas autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas darbību. Simulācijas ieejās izmantoti dati par elektroenerģijas patēriņiem LLU Mācību un Pētījumu saimniecības (MPS) “Vecauce” liellopu fermā, kura projektēta 530 govīm, un 2007. gada lokālā meteoroloģiskā informācija.

Elektriskās slodzes un pieejamo atjaunojamo resursu grafiks nedēļai 05.11.2007.–11.11.2007. dots 15. att. Simulācijas ieejā tika izmantoti arī gaisa temperatūras dati, lai ievērtētu tās ietekmi uz slodzes izmaiņu, piemēram, darbinot sildītājus pie temperatūras zem 0 °C.



15. att. Meteoroloģiskie dati un slodzes profili laika periodā
05.11.2007. līdz 11.11.2007.

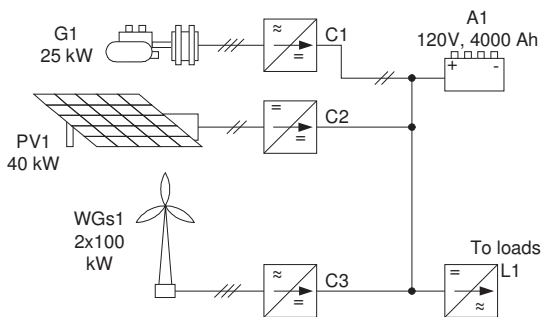
— – saules starojums; — — vēja ātrums; — — gaisa temperatūra; ◆ – slodze

Fig. 15. Meteorological data and load profiles for time period
05.11.2007. to 11.11.2007.

— – solar irradiation; — — wind speed; — — air temperature; ◆ – load

Kombinēto elektroapgādes sistēmu iekārtu konfigurācijas optimizācijas programmā “HOMER” tika atrasts autonomās kombinētas elektroapgādes sistēmas (turpmāk HPS2) variants atbilstoši pieejamajiem resursiem un slodzei (skat. 16. 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 biodegvielu. Ģeneratora degvielas patēriņš modelēts ar empīriski iegūto lineāro sakarību benzīna ģeneratoram: $Q = 3.6 \cdot 10^{-4} \cdot P_{el} + 1.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Ģeneratoram pie jaudas 25 kW tas atbilst $10.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ jeb $0.4 \text{ l} \cdot (\text{kWh})^{-1}$. Rādītāji 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. Akumulatora maksimālā uzlādes strāva ir 10 % no kapacitātes $I_{chmax} = 400 \text{ A}$. Spēka interfeisu C1-C3, kā arī slodzes invertora L1 lietderības koeficients $\eta = 90 \%$. Ekvivalentais HPS2 imitāciju modelis ar AVS interfeisu Simulink vidē parādīts 17. att.

Izmantojot izstrādāto uz SIL balstītu autonomās kombinētās elektroapgādes vadības algoritmu un stratēģiju darbības modelēšanas metodiku, tika modelēti un novērtēti divi tipveida dīzeļģeneratora vadības algoritmi enerģijas plūsmas pārdalei starp akumulatoru lādēšanu un slodzi (apskatīti Barley et. al., 1995): akumulatora cikliskā uzlāde un slodzes sekošana. Pēc cikliskās uzlādes algoritma iekšdedzes ģenerators tiek ieslēgts pie 50 % akumulatora uzlādes līmeņa un atslēgts, sasniedzot 90 % uzlādes līmeni. Slodzes sekošanas algoritms paredz ģeneratora ieslēgšanu, ja slodzes jauda pārsniedz pieejamo jaudu no atjaunojamiem resursiem.

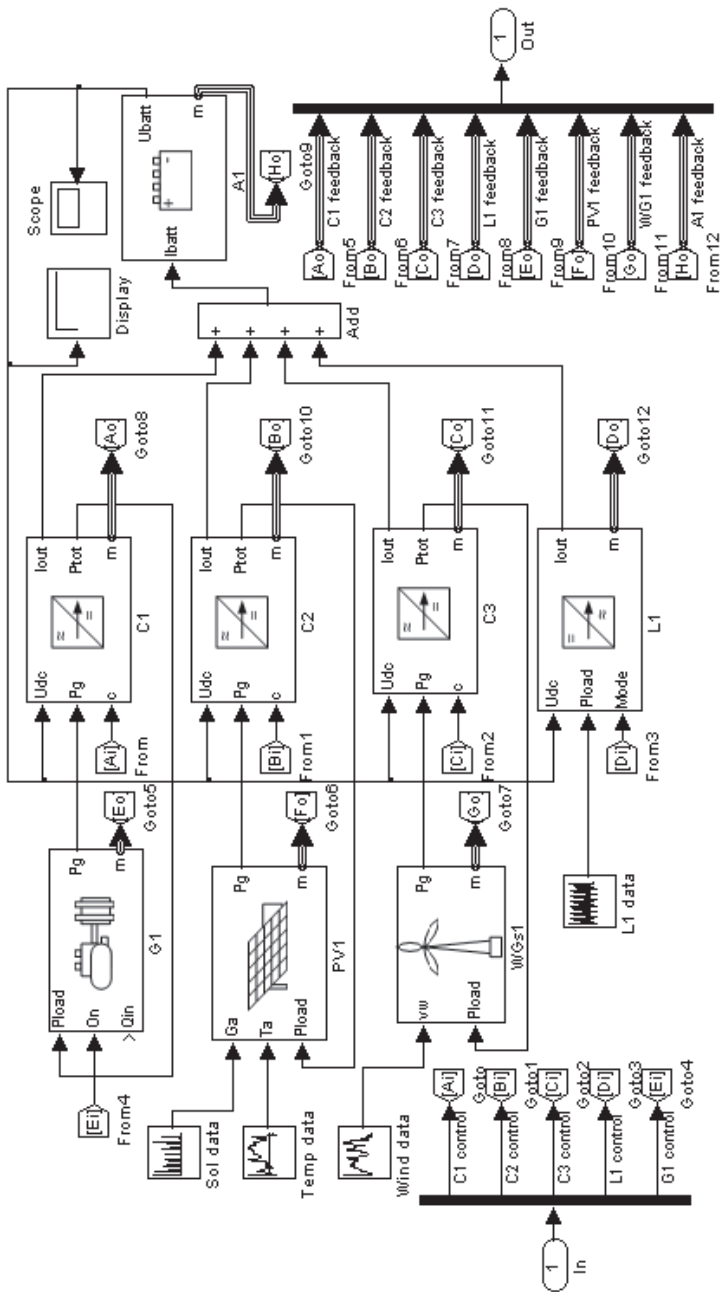


16. att. **Vienkāršota liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes sistēmas iekārtu slēguma shēma**

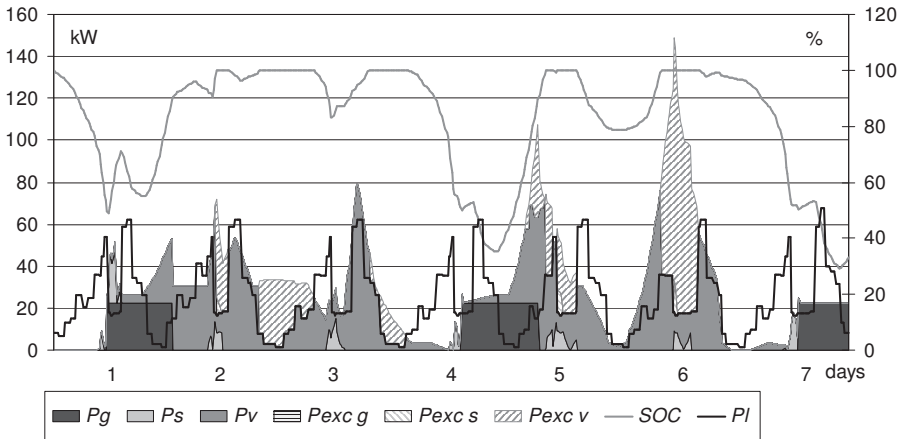
Fig. 16. Simplified connection diagram of autonomous hybrid power supply equipment of a cattle farm

Lai panāktu maksimāli lietderīgu degvielas patēriņu pie slodzes sekošanas algoritma, 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 nelādējo 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 akumulatora strāvas svārstībām ap iestatīto ieslēgšanas strāvas robežu.

Aprakstītie algoritmi realizēti vadības programmā .NET vidē, izmantojot 2.1. nodaļā aprakstīto objektu modeli. AVS regulēšanas periods ir 60 s, t.i. .NET vides programma aprēķina vadības iedarbes, iestata nepieciešamos Matlab vides ieejas un inerciālo bloku stāvokļu vērtības un uzsāk Simulink modeļa simulāciju 60 s periodā, pēc kura nolasa rezultātus no Matlab vides mainīgajiem. Visas Simulink modeļu simulācijas tika veiktas, izmantojot mainīgu soli un “ode23tb” algoritmu. 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 aptuveni 67 minūtēs. Tika veiktas vairākas simulācijas diennakts un nedēļas laika posmiem pie dažādiem atjaunojamo resursu pieejamības scenārijiem. Simulācijas rezultāti nedēļas scenārijam ar mainīgu vēja ātrumu 05.11.2007.–11.11.2007. grafiski parādīti 18-19. att.



17. att. Liellopu fermas autonomās kombinētās elektroapgādes imitāciju modelis ar AVS interfeisu
 Fig. 17. Simulation model with control system interface for autonomous hybrid power supply of a cattle farm



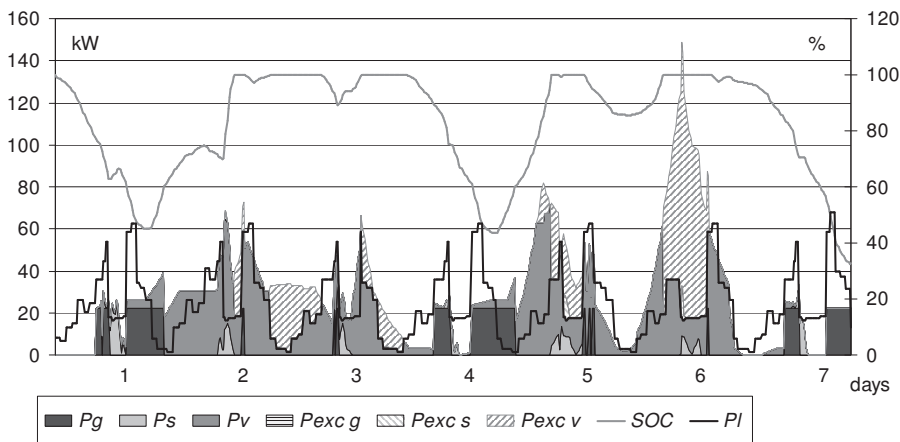
18. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti akumulatora cikliskās uzlādes algoritmam

Fig. 18. Simulation results of system operation for cyclic battery charge algorithm

Simulācijas rezultātu grafikos ir iekļautas slodzes jauda P_l , kW un sistēmā patērētā atjaunojamo un fosilo resursu elektriskā jauda (bet ne kopējā ģenerētā, 10 % zudumi avotu spēka interfeisos ir atskaitīti): P_S saulei, P_V vējam, P_G iekšdedzes ģeneratoram, kW. Tāpat doti akumulatora uzlādes līmenis SOC , % un neizmantotā jauda iekšdedzes ģeneratoram, saules baterijai un vēja ģeneratoriem attiecīgi P_{excG} , P_{excS} , P_{excV} , kW. Lai grafiski uzskatāmi parādītu atjaunojamo un fosilo resursu daļu slodzes nodrošināšanā, tika izmantoti grafiki ar vertikāli summēto laukumu (*stacked area*).

Palielinātās vēja resursu pieejamības ietekmē pēc cikliskās uzlādes algoritma iekšdedzes ģenerators darbojās 26 % no kopējā simulācijas laika, ieslēdzoties trīs punktos, kur sakrita atjaunojamo resursu pieejamības kritumi un slodzes lēcieni (skat. 18. att.), bet 63 % no kopējā laika akumulatora uzlādes līmenis SOC bija augstāks par 80 %. Slodzes sekošanas algoritmam šīs daļas ir attiecīgi 23 % un 55 %, un G1 ieslēgšana sakrita ar slodzes jaudas lēcieniem. Abās simulācijās lielāko daļu laika akumulators bija pilnībā uzlādējies no atjaunojamajiem resursiem, grafiski SOC līknes izmaiņas atkārtojas. Līdz ar to slodzes sekošanas algoritmam samazinājās kopējais iekšdedzes ģenerators darbības laiks un nepatērētā atjaunojamo resursu enerģija: 10.5 kWh (nepatērētā saules enerģija), 71.0 kWh (vēja enerģija). 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 uzlādes līmenis. Sistēmas darbības

simulācija parādīja, ka cikliskās uzlādes algoritmam nedēļas laikā netika patērēta enerģija no saules baterijām 52.9 kWh apjomā un 1436 kWh no vēja ģeneratoriem, slodzes sekošanai attiecīgi 42.4 kWh un 1365.4 kWh. Tas apstiprina pieņēmumu par iespējamo neregulāri pieejamo atjaunojamo resursu zemo izmantošanas efektivitāti pie mainīgas slodzes. Turklāt nākamajās dienās samazinās atjaunojamo resursu pieejamība, tāpēc tiek izmantots dīzeļģenerators un akumulatoros uzkrātā enerģija.



19. att. Sistēmas darbības simulācijas rezultāti modificētajam slodzes sekošanas algoritmam

Fig. 19. Simulation results of system operation for modified load following algorithm

Līdz ar to, veicot simulācijas SIL režīmā pie dažādiem resursu pieejamības un slodzes scenārijiem, iespējams modificēt enerģijas plūsmas vadības algoritmus, panākot optimālu atjaunojamo resursu izmantošanu un samazināt nepieciešamo ģenerējošo un uzkrājošo iekārtu kapacitāti. Izstrādātā sistēmas vadības programmatūra ar minimālām izmaiņām var tikt izmantota vadības iekārtas realizācijā.

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 autonomās kombinētās 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.

- 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.
- Darbā piedāvāto vadības iekārtas programmatūras Microsoft .NET vadības sistēmas objektu modeli 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.
- 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.
- 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).
- 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 algoritma: 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.
- 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 modeli kompilētas bibliotēkas veidā.

BACKGROUND OF THE RESEARCH

According to the statement of the European Environment Agency, European Union and Latvia has a strong dependence on domestic and foreign natural capital and ecosystems (State of the environment..., 2010). In accordance with the Eurostat data (Share of renewable..., 2011) approximately 34.3 % of energy consumed in Latvia in 2009 came from renewable sources of energy, which is the third result in Europe after Sweden and Finland with EU average 11.7 %. The share of electricity from renewable resources in Latvia is 38.7 %. However, the total national energy self-sufficiency is only 29.6 % (Latvijas enerģētika skaitļos..., 2009). One of the possible ways to increase the energy independence is the use of locally available renewable resources. According to the Latvian Sustainable Development Strategy to year 2030 (Latvijas ilgtspējīgas attīstības..., 2010) one of the goals is to increase energy self-sufficiency through use of renewable resources and energy efficiency. The tasks to achieve this goal are the diversification of renewable energy sources and supply routes, as well as innovation and research in renewable energy.

Future electricity networks are focused on distributed generation systems (DGS) and microgrids. The emphasis is not only on large central power stations, but also on wide area distributed small-scale power plants (in various sources of information from 1 to 1000 kW and to 10 MW), which are operating from wind, solar, biomass, etc. locally available renewable energy sources (Bayod-Rujula, 2009). One of the trends in the development of microgrids is autonomous power supply without a permanent grid connection. Autonomous power supply is used in the cases where there is no available electric grid connection, the capacity of existing connection is insufficient and the construction or upgrade of the connection is not economically justified. If there is a limited availability of renewable resources (irregular wind speed and solar radiation), which is typical for Latvian territory, several resources are combined in a single autonomous system making a hybrid renewable power system. Uninterruptible power supply in autonomous hybrid power systems is ensured by the use of chemical batteries, fossil resources generators and perspective energy generation and storage equipment, such as concentrated solar photovoltaic, flywheels, electrolyzers and fuel cells, supercapacitors etc.

Considering the rapid development of renewable energy technologies, particularly solar cells, electrochemical and other types of energy storage as well as power electronics converters, autonomous power supply systems are becoming an alternative to the construction of a new electrical grid connection for micro-scale electric power consumers (by the classification of the European Parliament Directive 2004/8/EK – the maximum simultaneous power up to 50 kW), for example, small agricultural facilities, farms, greenhouses, estates, tourist attractions etc.

Depending on locally available resources and electrical load schedule, autonomous hybrid power systems can have a large number of different combinations of equipment both functionally and in terms of scale. Irregular and difficult to predict load power distribution during the day and seasonally is particularly characteristic for agricultural facilities, such as farms that specialize in biological processes: dairy and beef cattle, swine growing, greenhouses with automatic plant watering and fertilization, etc.

A proper energy flow distribution strategy between irregularly available renewable resources, fossil resource generators, battery charging and electric load would hypothetically result in more efficient use of available renewable resources in hybrid power systems, reduce fossil resource generator operation time and cycles of battery use to ensure continuous power supply to the consumer. Computer modelling and simulation are widely used in research of hybrid power systems. The researches can be divided into two groups: dynamic simulation modelling of dynamic behaviour of hybrid power systems equipment and static time series models for long term (daily, seasonal and yearly) simulation.

Scientific and practical literature discusses a variety of approaches for facility and segment-level control and dispatch strategies of fossil generators and batteries in autonomous hybrid power systems with changing availability of energy resources and load. Hybrid power system modelling and simulation environments are also available, such as HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) and Hybrid2, where standard high level control algorithms and strategies are realized. On the other hand research is carried out on advanced facility and segment-level control solutions, where information and communication technologies and artificial intelligence are applied, such as prediction of available power from renewable resource generators by using meteorological forecasts, adaptive control, which uses neural networks to predict and adjust to changing load, intellectual agents etc. Implementation of these methods requires relatively complex programming and interfacing to different software modules, this is not provided by currently available simulation environments.

A possible solution is modelling individual parts of control loop separately, i.e. several types of virtual models are combined, e.g., the control object is modelled in a dynamic simulation environment, but controller software is implemented as a separate program, this is known as software in the loop (SIL) technique. Similarly in hardware in the loop (HIL) technique, individual parts, e.g., controller or sensors are real devices, but the rest – virtual models simulated on a computer and connected to the loop using special signal and power interfaces. It should be noted that in literature this approach is not widely addressed directly to the studies of segment and facility level control algorithms and strategies of autonomous hybrid power systems.

HYPOTHESIS, AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

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

This approach would also allow the controller software, which is tested and evaluated in a modelled environment, to be used without significant changes in the control of hybrid power system equipment

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 the autonomous hybrid power system and modelled 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 an autonomous wind, photovoltaic and combustion engine generator hybrid power system of an agricultural facility and to analyze operation of control algorithms with respect to effectiveness of combined resource utilization.

APPROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK

The research was carried out in the time period from September 2007 up to January 2012 in the Institute of Agricultural Energetics, Faculty of Engineering, Latvia University of Agriculture. The results of the research were summarized in 8 publications, 6 of them comply with the requirements of internationally recognized scientific publications. The results of the research were discussed in 6 international scientific conferences in Latvia, Greece and Turkey and used in 2 scientific projects at the Latvia University of Agriculture.

Internationally recognized scientific publications

1. Osadčuks V., Galiņš A. (2007) Application of the object oriented approach in the research of autonomous power supply systems. **In:** *Engineering 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:** *Engineering for Rural Development: Proceedings of the 10th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2011, Latvia. pp. 311-316.

Other publications

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 5th 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.

Scientific conferences

1. The Real-time control system in combined electric power supply. International Scientific Conference dedicated to 5th 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.

Other conferences and seminars

Seminar “Smart house technologies: conscious opportunities”, held in Institute of Mathematics and Informatics of University of Latvia, 16.12.2008. Organizers: Ventspils University College, LUA Faculty of Engineering Institute of Agricultural Energetic, “Mikro dators” Ltd. Title of the report: “Control of lighting with M-bus”.

Projects

1. ERAF project “Usage of electroenergy in motor vehicle of physical persons” No.2010/0305/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/130. Time period: 01.01.2011. – 31.08.2011.
2. LUA research project “Increasing energy efficiency with “SmartHouse” Technologies”, No. XP134. Time period: 01.03.2008. – 31.12.2008.

The research has been carried out with the support of European Social Fund. Agreement No. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017.

1. THEORETICAL STUDIES OF HYBRID POWER SUPPLY EQUIPMENT AND CONTROL SYSTEMS

The object of the research is the micro-scale autonomous hybrid power systems, which operate in variable load and primary energy availability conditions. In micro-scale systems with maximum power limit of 50 kW it is possible to use a low-voltage DC bus, its main advantages compared to the alternating current bus is a simplified power source switching, the main controllable parameter is the only bus voltage and the possibility to connect batteries directly to the bus. It is expected that, due to the development of power electronics, the use of DC bus in DGS in the coming years will grow (Manwell et.al., 2006). Suitability of centralized DC bus architecture for micro-scale hybrid power systems is approved in a number of researches (Noroozian et.al., 2009, Paska et.al., 2009, Zhou and François, 2011). The features mentioned above allow to hypothetically look on the DC bus compared to the AC bus as more suitable solution for autonomous and microgrid type power system solutions. This is especially relevant for highly periodical daily electric load profile in agricultural facilities, which is affected by consumers such as milking machines, milk coolers, manure conveyors etc., and with irregular availability of renewable resources it is necessary to periodically run additional generators.

1.1. Autonomous hybrid power systems with central DC bus

The general block diagram of the autonomous power supply system with central DC bus is shown in Fig. 1. The bus voltage is maintained by adjusting the available power from the primary energy sources: irregularly available renewable generators (sun and wind), constantly available renewable and fossil additional generators with limited source (diesel, biogas) and energy accumulators (flywheels, fuel cells, supercapacitors etc.). Additional regulatory effects can be achieved by turning on or switching off the dump electrical load or by the accumulation of energy. Accumulators directly connected to the bus are used to stabilize voltage and filter transients. Such system has a complex multi-level automatic control, which in the scope of the thesis is structured by the levels of production automation (Кругляк, 2002).

The control object of the segment level automation is a DC bus, where voltage should be controlled. Actuators of the control system are power interfaces (rectifiers and DC converters) connected in parallel to the bus. The segment automation level ensures the DC bus management and energy flow distribution by setting power interface operating modes (switching on and off, setting voltage and current reference values). Control of output of power

interfaces, generation and energy accumulation equipment is maintained by local controllers, which form the device automation level.

Supervisory control and data acquisition (SCADA) systems form the highest or complex level of automation. This level can also include several DGS in a single complex and provide supervisory control to objects that are not directly related to power supply, e.g., control of “smart house” equipment.

1.2. Methods of development of the model set

For assessment of control algorithms and strategies of complex and segment level automation an approach with modelling of individual parts of a control loop, where the controller is a real device or discrete software program and the control object is a virtual or physical model, is used. As an example in Fig. 2 (a) a simple closed system with a negative feedback for control of a single parameter is given. Hardware components are blocks with shading, virtual models – without shading. It should be noted, that the discussed approach is used also in modelling of complex systems with a number of controlled parameters.

The approach where individual parts of the control loop are modelled can be distinguished into the following methods:

- Model In The Loop (MIL), which is basically a classical computer simulation model of a dynamic system and its controller in a single environment (Plummer, 2006), e.g. Matlab Simulink (see fig. 2 (b));
- Hardware In the Loop (HIL), where individual parts of the control loop (e.g., plant or controller) are virtual models, but the rest are real devices (Gomez, 2001); depending on the scope of the research (control system development and testing, evaluating plant and sensor behavior under various control algorithms and modes) the method is further divided into the power HIL and controller HIL (see fig. 2 (c and d));
- Software In The Loop (SIL) is a purely software method for research of control systems operation, where models of an actuator, plant and sensor are developed in a dynamic simulation environment, but the controller is realized as a standalone program, for example, as an executable file compiled from C-code (Youn et.al., 2007, Mauri, 2009), see Fig. 2 (e).

The discussed HIL and SIL methods are used in control system development and testing, if the object of the control system is a complex, unique in its configuration or expensive system, if control system testing on real hardware is impossible, dangerous, resource consuming or if the hardware is in the stage of development and is not currently available (Ledin, 1999,

Gomez, 2001). The HIL and SIL methods have already been used in the research and development of renewable energy systems equipment and DGS including hybrid power supply systems. The use cases include simulation of individual generating devices, connection to the grid, design of control systems for electronic power interfaces at the device automation level, experimental benches for electrical machines etc.

An autonomous hybrid power system, which is using simultaneously several types of renewable resources, is a complex system with stochastic perturbations. Depending on locally available resources and the load profile there can be a large number of combinations for generating, accumulating and power interface equipment. This corresponds to the SIL and HIL use cases discussed in the literature. However, information about use of these methods in the studies of control of hybrid power systems at the complex and segment level of automation does not appear widely in literature.

The SIL and power HIL methods were used in order to demonstrate the suitability of the discussed modelling approach for evaluation and realization in control software various energy flow control algorithms and strategies. The block diagram of control system and simulation model set for SIL mode proposed by author is shown in Fig. 3.

For the development of control system software model Microsoft .NET environment was used. It insures the possibilities of code reuse on a number of operating systems and allows software development using Model Driven Architecture (MDA). Consequently, control software, which has been tested in the SIL mode with minimal modifications can be used in a final controller solution (personal or industrial computer, embedded system etc.). A class library with common autonomous hybrid power system power interfacing, generating and accumulating equipment was designed to interconnect the control software with real devices and their simulation models (see Chapter 2.1.). Simulation model library of hybrid power system equipment was designed in Matlab Simulink environment. The library contains all components of the control loop except the controller and all the models are controllable from a .NET program.

For information interchange between the control software and Matlab workspace Matlab Compiler V4 tool (Version 4.0 (R14) Matlab Compiler) from libmx.dll and UtilityMatlabCompilerVer4.MatlabCSharp wrapper class by (Phan, 2004) were used. Access to the Simulink model in its turn was realized using the standard Matlab function SIM('model', timespan, options, ...). The function takes parameters – path to Simulink model, simulation timespan, configuration and inputs for the model. The result of the simulation – time, output signals and states of inertial blocks – is obtained through Matlab workspace variables.

The simulation of the model is performed by periods. The control software reads the simulation results, which represent the sensor readings at the end of each period and sends control signals to the model at the beginning of the next period. The simulation process is shown in detail on simulation time t axis in Fig. 4. In Simulink depending on the used solver and rate of signal changes simulation period T is split into steps s_m , consequently for periods of equal timespan there can be a different number of steps. At the beginning of the simulation initial control signals are passed to the model (vector with J elements).

Outputs are read at the end of each simulation period as a matrix of size $[M_i;K]$, where M_i is a count of simulation steps in a period T_i , but K – count of model output signals. The function f_c determines control reference signals for the next period T_i only from output of the last simulation step of the previous period T_{i-1} and returns a signal vector with J elements, which then is sent to the model at the beginning of T_i . Thus, the control system reads the sensor values with a period T , which wherewith is a control period of the controller. Alongside at the beginning of each period states of inertial blocks from the previous period are set to make the simulation process continuous. The simulation results are combined together in all periods, including all steps in each period.

Since in the SIL mode .NET program exchanges data with the Simulink model only after the end of each simulation period; the real-time aspect of the controller software operation is not taken into account, i.e., only functionality of the controller is studied. The SIL simulation method, considering real-time performance of the controller and its software is discussed in detail by (Youn et.al., 2007).

Operation of the segment level control software model in power HIL mode is demonstrated using physical models of the DC bus and power interfaces (step down converters), see Fig. 5. For the control of physical models the same class library and control program as in SIL simulation were used. Differences are only for the classes at the hardware interface level. If in the case of SIL a wrapper class for Matlab workspace was used, then control of a physical model is performed through the digital communication network (RS485 at physical layer and IEC870-5 at data link). Operation of the experimental setup is discussed in detail in Chapter 3.1.

The overall control system modelling structure proposed by the author is shown in Fig 6. Hardware and software components are summarized in rows thus showing different types of control loop simulation and the corresponding stages of the control system development. The parts of the control loop are summarized in columns: controller; hardware interface for data interchange between the controller and rest of the loop; sensors, transducers and plant.

Besides SIL and power HIL simulation, a real system consisting of a photovoltaic module, lead-acid battery, load and solar charge controller was studied. The experimental data are compared to the simulation data of the corresponding Simulink models. The model set of a control system and autonomous hybrid power supply equipment was approbated in the SIL mode for evaluation of complex and segment level control algorithms. The data about electrical consumers of the agricultural facility (cattle farm) and meteorological information for determination of the output power of renewable generators were used as inputs of the simulation.

2. MODELS OF CONTROL SYSTEM, ACTUATORS, GENERATING AND ACCUMULATING EQUIPMENT

Within the study operation of the most commonly used equipment in autonomous hybrid power systems was examined in detail, simulation and object models of the equipment were developed for use with control system software. All equipment, except for the battery, can be connected to the central bus only through the power interfaces, therefore, to simplify models and accelerate the simulation electrical transient processes in generating and accumulating equipment were not modelled.

2.1. Object model of the control system

In the implementation of the software of the control system MDA and object oriented approach were used, methods and data needed for control of the hybrid power system equipment (actuators, sensors, communication equipment) were combined in a class diagram (Fig. 7). The MDA and object oriented approach have already been used in the modelling and development of control software for hybrid power systems (Zhu and Lubkeman, 1997, Agostini et.al., 2007). In this study the typical renewable resource generating and accumulating equipment class structure has been updated with methods for implementation of local controllers for device-level automation (accordingly to Коуд и.др., 1999) and classes required for HIL and SIL simulation methods.

Classification of the equipment is based on an abstract class “Device”. In order to provide an unified communication mechanism between control software and all devices or device simulation models class “Device” has a field of abstract class “HardwareInterface”. The abstract class “HardwareInterface” is extended by real classes “HPSimInterface”, “COMportInterface” and “MbusInterface”, which in their turn provide access to simulation an physical models as well as to real devices in the SIL and HIL modes (the 5th group, Fig. 7). The class “Device” has also methods and properties related to every device: switching on and off, reference designator, manufacturer’s part number etc.

The class “HybridPowerSystem” has a “Device” type list, which at a runtime of the programm is filled with instances of specific device classes (wind generator, diesel generator, battery, voltage and current sensors etc.). Segment level automation is implemented at the “HybridPowerSystem” class level and stays unchanged regardless of whether the “Device” instances reference real equipment, physical or virtual models.

The class “Device” is extended by class “PowerDevice” (1st group, Fig. 7), which generalize all power interfaces, generating and energy accumulating equipment; and by various types of sensors (2nd group, Fig. 7). “PowerDevice” in its turn is extended by abstract classes of various groups of hybrid power supply equipment: wind, photovoltaic and combustion engine generators, electrical load and power interfaces. Other types of devices can be added at this level of the class structure. Abstract classes of the “PowerDevice” group are extended by two groups of classes: for Simulink simulation models (3rd group, Fig. 7) and for the physical model of the DC bus (4th group, Fig. 7).

2.2. Simulation models of main actuators, generators, accumulators and loads

Since in the study it is intended to model and simulate hybrid power systems for different DC bus configurations, the overall system model was divided into separate components: voltage and current sources (power interfaces), generators, consumers and the DC bus. The developed Simulink block library is shown in Fig. 8.

The DC bus is modelled as an electrical circuit with parallel DC sources and loads, capacitance of the bus is assumed as constant, resistance and inductance of wires are not modelled. The main parameter to control is the voltage of the bus U_{dc} , which can be found by integrating the sum of currents of electrical sources and loads and dividing by the bus capacity (Shenkman, 2005):

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

where U_{dc} – voltage of DC bus;
 C_{dc} – capacitance of DC bus;
 I_{Gi} – currents of DC sources;
 I_{Li} – currents of DC loads.

Electrical generators, accumulators and AC loads are connected to the bus using power interfaces: DC converters, regulated rectifiers, inverters etc. The power interfaces can operate either as constant current or voltage sources or constant power, current or resistance loads.

Current and voltage setpoints for DC sources are generated by segment level control software, thus controlling the energy flow from different energy sources to consumers.

The input signals of unidirectional power interfaces, which are used to connect generators to the bus, are the voltage of the bus U_{dc} and available power from the generator P_g , but the outputs are positive current I_{out} and total consumed power in the power interface P_{load} (consist of power transferred to the bus and conversion losses). Energy sources or generators in their turn have available power output P_g and consumed power input P_{load} for connection to the power interface. Connecting electrical energy sources and power interfaces using the power signal allows to a model power interface with DC output and universal input, regardless of the output parameters of the primary energy source, allowing to simplify the model structure and speed up the simulation. Only currently available power for generating equipment is calculated and electrical transient processes for generators were not modelled in the study.

Inputs of constant power load are bus voltage U_{dc} and signal P_{load} to indicate the value of the load. The output current of the load I_{out} is negative, therefore it consumes power from the bus. Operation of constant resistance load is organized in the same way. Bidirectional power interfaces can operate in both, the current source and load modes and can be used for charging and discharging of different types of energy accumulators. Inputs of the battery and DC bus blocks are I_{batt} and I_{dc} respectively. These inputs are fed with a sum of all currents in the bus. The output of DC bus and accumulator blocks is the bus voltage U_{dc} . A hybrid power system model with a central bus can have only one of these blocks for summing currents and calculating the bus voltage. In addition to electrical signals remotely controllable blocks have the input signal vector “c” for control inputs and measure signals vector “m” for control feedback and monitoring purposes. Information exchange with supervisory control software in the .NET environment is performed using these ports.

Besides power interfaces and loads simulation models for the lead-acid battery, combustion engine generator (a generator with limited energy resource), photovoltaic generator or solar cell module and wind turbine generator were developed. The accuracy of all models, except for the wind generator was evaluated by comparing them with the actual plant data obtained experimentally.

3. COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA AND THEORETICAL MODELS

The model set of the autonomous hybrid power system was experimentally validated in two steps: using a physical model consisting of

reduced scale copies of real power interfaces and using real devices – solar photovoltaic module, charge controller, lead-acid batteries and constant resistance load.

3.1. Experiments with a physical model of the DC bus

The purpose of the experiment with a physical model is to demonstrate operation of the same segment-level control software in real time in power HIL mode and to compare the results with the simulation of the SIL model of the same configuration. The power HIL simulation was performed using physical models of the DC bus and power interfaces, but SIL – using simulation models in Simulink environment. The physical model is a reduced scale model of a real device with a local controller to regulate the output parameters and with data exchange interface for remote controls and monitoring. Software of the supervisory segment level controller was implemented using object oriented approach discussed in Chapter 2.1. The experimental equipment and data flow diagram are given in Fig. 5. Operation of the model and the control system was tested in the SIL and HIL modes performing automatic control of parallel-connected DC converters, using the same load-change scenario and the control algorithm. For this purpose an experimental step-down non-isolated DC converter “Buck1” with remote control capabilities was designed. The converter can operate in either voltage or current source mode and controls its output using PID regulator. The experimental setup (Fig. 9) consists of 3 “Buck1” DC converters and a remotely switchable 5-level resistive load module, which are connected to the DC bus in parallel with 2200 μF capacitor. Load levels are changed by switching parallel 100 Ω resistors using relays. All devices are connected to a single digital communication network as slaves; master is a personal computer (PC), which acts as a supervisory controller.

The supervisory control system is capable to pool all 4 devices in 50 ms average. The experimental data were collected both, by the control software of the supervisory controller (running on PC) and independently using the logging scope PicoScope3000. Simultaneously 4 channels (bus voltage and output current of each DC converter) were read with the scope at a period 22 ms. The Simulink model for the SIL mode in its turn is composed of idealized power interfaces (Fig. 10). The same supervisory control program was used for both simulation modes. The control program is running two threads: for control of power interfaces and execution of load switching scenario.

The SIL and HIL simulation results were compared for different load changing and power interface control scenarios. The simulation result comparison in Fig. 11 is for the following scenario. The DC converter C1 is operating in the voltage source mode and keeps constant bus voltage $U_{dc} = 8 \text{ V}$, but converter the C3 is operating in the current source mode, and begins to

source $I_{C3} = 150$ mA, if the output current of voltage source is $I_{C1} \geq 170$ mA. At the beginning of the scenario there is 100Ω load on the bus, which is increased in 4 steps to 20Ω by adding 100Ω in parallel at each step. It can be seen from the graph that the converter C1 most of the experiment time keeps stable bus voltage in both simulation modes, however, in the physical model a 16.8 V transient voltage surge can be observed, when C3 begins to source additional current to the bus. This is explained by the fact that the bus capacitor is charged by the current source converter. The voltage source converter accordingly to its PID regulator setting drops I_{C1} to zero, but the bus voltage remains above 8 V setpoint while the capacitor discharges. The problem can be solved by adjusting the PID parameters and increasing the control frequency or by coordinating the turning on the C3 converter and decreasing the output current of C1 at the supervisory control level. The surge is not observable in the SIL model because idealized power interfaces with maximal response time were used in the model. These voltage surges can also be filtered by adding a battery to the DC bus.

At 100 and 50Ω load levels only the converter C1 is operating, output currents in both simulation methods differ insignificantly: $I_{C1}^{SIL} = 80$ mA, average $I_{C1}^{HIL} = 82.1$ mA and $I_{C1}^{SIL} = 160$ mA, average $I_{C1}^{HIL} = 162.9$ mA. Differences in static signals appear, when C3 is turned on at the 33.3 and 25Ω load levels: $I_{C1}^{SIL} = 90$ mA, average $I_{C1}^{HIL} = 59.5$ mA and $I_{C1}^{SIL} = 170$ mA, average $I_{C1}^{HIL} = 138.7$ mA respectively, but $I_{C3}^{SIL} = 150$ mA and average $I_{C3}^{HIL} = 182.6$ mA. This can be explained with non-linearity in the current feedback of “Buck1”. The DC converter’s output was calibrated at 100 mA, but with the increase in current reference signal the current output error also increased (32.6 mA in this case). As a result the current source converter’s C3 output was above reference and C1 needed less current to voltage on the DC bus.

It should be noted that the discussed experimental setup where the control algorithm is implemented as a program in .NET environment is not a hard real-time system, the control period is 50 ms and delays in the controller response should be considered. This approach can be used in power HIL testing of control software in conditions close to real with DC bus with slow dynamic, if filtering capacitors or the battery are used. In contrast, in SIL mode, through the fact that the model in Simulink environment is driven by strictly defined time intervals, there are no time limits for the control signal output for the control software in .NET environment.

3.2. Experiments with a solar charge controller and battery autonomous system

The experimental validation of autonomous hybrid power system simulation models was carried out using solar charge controller Steca PR3030,

solar module Kioto KPV 195 PE, two sealed lead-acid batteries FIAMM FG2045 in series and two resistor arrays of different nominal. The experimental set-up (controller and batteries) is shown in Fig. 12. A typical connection circuit for PR3030 with load connected directly to the batteries was used. Using the experimental set-up it is possible to measure and log current I_{PV} and voltage U_{PV} of the solar module, current I_{batt} and voltage U_{batt} of batteries, load current I_{load} and solar irradiation G_s .

The experimental data were collected for different load switching and solar irradiation scenarios. The experiments were carried out in Jelgava, Latvia from 03.08. to 23.08.2011. The results were compared to the developed simulation model set; an equivalent Simulink model is given in Fig. 13. The model consists of a photovoltaic panel PV1, power interface C1, load R1, battery A1 and additionally constant power load block L1 to simulate self-consumption of the charge controller PR3030 used in the experiments. At the inputs of the model there are two external data series: solar irradiation (block “Ga_data”) and resistance value (block “R_data”). The resistance data were calculated from the experimentally measured U_{batt} and I_{load} data. The charging voltage reference signal u_r for the model of power interface C1 was taken from PR3030 data sheet, where 28.2 V is float charge end voltage. The current reference signal i_r is calculated in the block “Add2” as a sum of PR3030 self-consumption current, load current (both are negative, so they are subtracted) and maximum charging current (1.12 A). Before each test the batteries were charged to 26 ± 0.2 V (open circuit voltage).

The Results of the experiment in Fig. 14 were obtained on August 4, 15:35-16:05 with $\approx 21 \Omega$ and $\approx 7 \Omega$ loads turned on for different time intervals (0:30-10:00 min). The experiment shows the charging of the accumulator in changing photovoltaic power conditions during a partly cloudy day. The measured and modelled battery voltage U_{batt} had a little difference during sufficient solar irradiation to compensate the load: the average square error 0.65 V or 2.7 % of nominal battery voltage. The error increased when irradiation lowered to $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and load was turned on after 15 to 24 minutes from the beginning of the test, a possible reason is constant internal resistance used in the Simulink model of the battery.

A larger error was for current of the battery with disconnected load – 0.6 A average, which could be related to the PR3030 controller charging characteristics at a high battery state of charge and when the photovoltaic module output power exceeds the load consumption, whereas the Simulink model of the power interface operates as voltage or current source output. The error decreases when load is connected. The modelled load error in all experiments was below 0.034 A, i.e. 2.9 % of the theoretical value for 24 V nominal battery voltage and 21Ω load and 0.8 % for 24 V battery voltage and 7Ω load.

4. APPROBATION OF THE MODEL SET

The developed model set was approbated in the modelling and simulation of autonomous hybrid power supply of a cattle farm. At the inputs of simulation electrical consumer data from the LUA Training and Research Centre “Vecauce” cattle farm, which is designed for 530 cows and local meteorological information for the year 2007 were used.

The chart of electrical load and available renewable resources for one week 05.11.2007–11.11.2007 is given in Fig 15. Local temperature data were used at the inputs of simulation in order to consider effects of air temperature on load changes (e.g., operation of electrical heating devices at temperatures below 0 °C).

An optimal hybrid power supply equipment configuration (hereinafter HPS2) for the given load profile and available resources was found in hybrid power system optimization software “HOMER”, see Fig. 16. The sources of energy are two Fuhrländer 100 kW wind generators WGs1; 40 kW photovoltaic array with an optimal stationary (non-tracking) orientation PV1 consisting of 200 Kioto 195 modules; and a 25 kW combustion engine generator G1, which can operate on fossil or biofuel. The fuel consumption of the generator was modelled using empirical linear equation of an otto-engine generator: $Q = 3.6 \cdot 10^{-4} \cdot P_{el} + 1.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. For 25 kW power it corresponds to $10.06 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ or $0.4 \text{ l} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ consumption at full power. The consumption corresponds to 25-30 kW diesel generators available on market (Approximate Diesel Fuel..., 2011).

For interconnection of the power system equipment 120 V central DC bus with directly connected 4000 Ah deep discharge lead-acid battery A1 is used. The maximum charge current of the battery is 10 % of the capacity: $I_{chmax} = 400 \text{ A}$. The efficiency of power interfaces C1-C3 and inverter L1 is $\eta = 90 \%$. The equivalent HPS2 simulation model with control system interface in Simulink environment is given in Fig. 17.

Two standard combustion engine generator dispatch strategies for energy flow distribution between battery charging and load were modelled and evaluated using the developed methodology for modelling and simulation of autonomous hybrid power supply control algorithms using the SIL approach. The algorithms used (accordingly to Barley et. al., 1995) were cyclic battery charging and load following. According to the cyclic charge algorithm the generator is used only for battery charging and is turned on and off at certain levels of charge of the batteries (50 % and 90 % in the case). In the load following approach the combustion engine generator is used only to compensate excess electrical load that cannot be covered by renewable generators.

In order to achieve maximum efficiency in the fuel consumption for the load following strategy the combustion engine generator is turned on only if discharge current of the batteries is 20 A more than can be sourced by the converter C1 at nominal power of G1 and nominal system voltage – 120 V. Thus, it is insured that the generator is operated with a power close to nominal and it compensates the power deficit from renewable resources and does not charge the batteries. In order to avoid deep discharge of the batteries the load following strategy was combined with cyclic charge with a narrow operation interval: G1 is turned on at 40 % discharge level and charging is ended at 60 %. Consequently, according to the load following strategy the batteries then are charged to the full capacity using only renewable resources. The minimum operation time of the generator is 30 min to prevent frequent switching of the generator due to the battery current changes around the start current limit and to conserve fuel.

The discussed algorithms are implemented in control system software in .NET environment using the object model discussed in Chapter 2.1. The control period is 60 s, i.e., the program in .NET environment calculates control signals, sets control inputs and continuous states and starts simulation of the Simulink model for 60 s period. After that the results are read from Matlab workspace variables. All simulations were performed using the variable step solver “ode23tb”. The simulation speed with respect to real time for the discussed HPS2 configuration depends on the intensity of transients in the simulation and is averagely 150:1, i.e., simulation of the power supply and control system for a 7-day period with different control algorithms took approximately 67 min. A number of simulations were performed for single day and 7-day periods with different renewable resource availability scenarios. The simulation results for a week scenario with variable wind speed for the time period 05.11.2007–11.11.2007 are shown in Fig. 18 and 19.

The charts summarize the load P_l , kW and consumed power from different sources (without 10 % losses in power interfaces): P_S from photovoltaic array, P_V from wind generators, P_G from combustion engine generator, in kW. The state of charge of the batteries SOC , % and excess power for photovoltaic array, the wind generator and combustion engine generator respectively P_{excS} , P_{excV} , P_{excG} , in kW are given also. The stacked area charts were used to show parts of fossil and renewable generator power in the supply of load.

The simulation shows that with increased availability of wind resource the combustion engine generator is operating 26 % of total simulation time for the cyclic charge algorithm. It was turned on in three points with simultaneous low availability of renewable resources and load power peaks (Fig. 18), but 63 % of the simulation time SOC of the batteries was above 80 %. For the load following algorithm G1 operated 23 % of time and SOC above 80 % was 55 %

of the simulation time. The combustion engine generator is turned on each time when P_l exceeds the sum of P_S and P_V by 27.4 kW (nominal power of the generator and 2.4 kW needed to ensure that the generator will operate at full load).

In both simulations most of the time batteries were fully charged from the renewable resources, graphically the changes in *SOC* curves are repetitive. Consequently, for the load following algorithm the total operation time of G1 and excess energy from renewable sources decreased by 10.5 kWh (excess photovoltaic energy) and by 71.0 kWh (excess wind energy). The simulation graph clearly demonstrates that for both algorithms on day 6 an excess wind power peak appears, but on day 7 in its turn there is a shortage in renewable resources, therefore, G1 needs to be operated and *SOC* of the batteries decreases rapidly. The simulation shows that the total excess energy for the cyclic charge algorithm from photovoltaic array is 52.9 kWh and from wind generators – 1436 kWh, for the load following algorithm – 42.4 kWh and 1365.4 kWh respectively. This confirms the assumption on the possible low consumption efficiency of irregularly available renewable resources in changing load conditions. In addition, if on the next days reduced availability of the renewable resources takes place additional generators with constant resource availability or batteries should be used.

Using the SIL simulation of autonomous hybrid power systems with different resource availability and load-changing scenarios it is possible to modify standard energy flow control strategies and algorithms to achieve optimal resource utilization and decrease the necessary capacity of the generating and accumulating equipment. The developed control software can be used with minimal changes in the implementation of a control system.

CONCLUSIONS

1. The use of several alternative renewable resources in a single hybrid power system and optimal energy flow control and distribution between generating and accumulating equipment and the consumer can compensate the increasing electricity demand of agricultural facilities and reduce energy dependence.
2. By using the developed modelling methodology in simulation of an autonomous hybrid power supply system of a specific agricultural facility it can be concluded, that advanced energy flow control strategies discussed in literature, which use feedback from the consumer, weather forecast in prediction of renewable resource generators output, intellectual agents etc. can improve utilization of renewable resources, decrease ineffective operation time of additional generators and use of accumulators.

3. The main advantage of the software and hardware in the loop approaches in the evaluation and improvement of segment and complex level control systems of autonomous hybrid power supply in comparison to the existing simulation environments is possibility to freely design and modify control algorithms in standard high-level programming languages. It also allows using model driven architecture for software development and implementing the software in final control system solution with minimal changes.
4. The proposed control software object model in Microsoft .NET can be realized in other runtime environments (Java, Mono) and object-oriented programming languages. In the development of simulation models of the equipment no Matlab Simulink specific libraries were used, therefore the same models can be implemented in alternative dynamic modelling environments.
5. Operation of the segment level control system model in real time has been demonstrated by controlling the DC bus voltage using physical models of power interfaces. The control period of 50 ms is sufficient to hold stable voltage in the bus with changing load and a suitable filtering capacitor or battery.
6. Simulation models of common equipment of hybrid power supply systems have been developed and experimentally validated: a low power combustion engine generator – linear statistical model with 95 % significance, photovoltaic generator – mathematical model with 1.5 % accuracy, lead acid battery – mathematical model, constant internal resistance assumed (accuracy 1.7 % of nominal voltage in the middle portion of the charge/discharge curve).
7. The results obtained by the simulation of autonomous hybrid supply and its control system for the LUA Training and Research Centre “Vecauce” cattle farm with 200 kW wind generators, 40 kW photovoltaic array, 25 kW diesel generator and 120 V, 4000 Ah battery bank show that in comparison to the cyclic battery charge algorithm renewable resources are utilized more effectively using the load following algorithm: by 81 % in sunny time in May and by 5 % in conditions with irregular wind speed in November. The fuel consumed by the generator decreased by 12 % for one-week period in May and by 8 % in November.
8. The simulation speed of the model against real time depends on the intensity of transients in the simulation and is averagely 150:1. Compiling the Simulink model into standalone library can increase the simulation speed.

INFORMĀCIJAS AVOTI

(SOURCES OF INFORMATION)

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. *Approximate Diesel Fuel Consumption Chart*. (2010) [online] Diesel Service & Supply [cited 23.10.2010.]. Available: http://www.dieselserviceandsupply.com/diesel_fuel_consumption.aspx.
3. Bayod-Rujula A.A. (2009) Future development of the electricity systems with distributed generation. *Energy*, No. 34, pp. 377-383.
4. Gomez M. *Hardware-in-the-Loop Simulation, Embedded System Design*. (2001) [cited 20.09.2009.]. Available: <http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=15201692>.
5. *Latvijas enerģētika skaitļos*. (2009) [tiešsaiste] Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija [skatīts 05.10.2010.]. Pieejams: <http://www.em.gov.lv/images/modules/items/les2009.pdf>.
6. *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.
7. Ledin J.A. (1999) Hardware-in-the-Loop Simulation. *Embedded Systems Programming*, No. 2, pp. 42-60.
8. 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.
9. Mauri M. (2009) *Hardware in the Loop Simulation of Renewable Distributed Generation Systems*. *Renewable energy: InTech*, 2009. pp. 133-152.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. Phan J. (2004) *MATLAB C Book*. : LePhan Publishing, 2004. 151 p.
14. 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.
15. *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.
16. Shenkman A.L. (2005) *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*. : Springer, Dordrecht, 2005. 569 pp.
17. *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/vide-eiropa-2010-2013-stavoklis/at_download/file.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Коуд П., Норт Д., Мейфилд М. (1999) *Объектные модели, стратегии, шаблоны, приложения*. Москва: ЛОРИ, 1999. 434 стр.
22. Кругляк К. (2002) Промышленные сети: цели и средства. *СТА*, No. 4, ст. 6-17.