

TEHNISKĀ SPECIFIKĀCIJA

Termālo un elektrisko simulācijas modeļu izstrāde modulārai dzelzceļa vilces bateriju sistēmai dzelzceļa specifiskos darba ciklos

DIGAS, SIA

Projekta konteksts: modulāra bateriju sistēma un elastīga enerģijas pārvaldības sistēma (EMS) dzelzceļa ritošā sastāva hibridizācijai

Rīga | 2026. gada 5. oktobris (versija 1.5) – tulkojums latviešu valodā; atšķirību gadījumā noteicošais ir teksts angļu valodā

Pielikums Nr. 2 iepirkuma priekšmeta aprakstam DIGAS-ZKC-2026/1

Projekts Nr. 1.2.1.2.i.2/1/24/A/CFLA/008 “MASOC KC atbalsts zaļu produktu izstrādei”, pētniecības projekts Z.3.4

Finansē Eiropas Savienība – NextGenerationEU

Dokumenta kontrole

Pozīcija	Prasība / informācija
Dokumenta veids	Tehniskā specifikācija publiskajam iepirkumam
Versija	1.5 (05.10.2026) – iepirkuma priekšmeta apraksta DIGAS-ZKC-2026/1 2. pielikums. Izmaiņas salīdzinājumā ar v1.4 pēc MASOC KC 05.10.2026. komentāriem: prasības simulācijas modeļiem formulētas kā prasības modelim (“programmatūra”/“rīks” aizstāts ar “modelis”); katrs ievades lauks ir vai nu obligāts, vai “var atstāt tukšu” (jauns 4.4. punkts, A pielikums); neviennozīmīgi formulējumi (“ja pieejams”, “ja attiecināms”, “pēc izvēles”, “vēlams”, “viens vai vairāki”) aizstāti ar skaidrām prasībām; noteikts bateriju zaru skaits (§8), pieņemšanas pielāides (§28.1) un izpildes laiks (§29); lietotāja rokasgrāmata aizstāta ar modeļu aprakstu un verifikācijas pārskatu (§30). Iepriekšējās izmaiņas (v1.4, 02.10.2026.): transportlīdzeklī izmantojamā EMS/BMS vadības programmatūra izslēgta (§1); bez apmācību sesijas un bez garantijas; vispārīgs nosacījums “vai ekvivalents” (§1). Ir sagatavots tulkojums latviešu valodā; neatbilstību gadījumā noteicošais ir teksts angļu valodā.
Iepirkuma nosaukums	Termālo un elektrisko simulācijas modeļu izstrāde modulārai dzelzceļa vilces bateriju sistēmai dzelzceļa specifiskos darba ciklos
Galvenie lietotāji	DIGAS bateriju, BMS/CMS, termiskās pārvaldības un transportlīdzekļa integrācijas inženieru komandas
Sagaidāmais rezultāts	Rediģējami, dokumentēti un validēti termālie un elektriskie simulācijas modeļi ar lietotāja saskarni, mašīnlasāmām saskarnēm, modeļu pirmkoda failiem un aprēķinu dokumentāciju
Konfigurācijas princips	Neatkarīga no ķīmiskā sastāva un topoloģijas. Visām topoloģijas, šūnu, dzesēšanas un transportlīdzekļa vērtībām jābūt lietotāja konfigurējamām.
Pieņemšanas princips	Pieņemšana, pamatojoties uz reproducējamu skaitlisku verifikāciju, sintētiskiem atsaucējiem, lietotāja iesniegtām datu kopām un savstarpējām pārbaudēm pret analītiskiem risinājumiem vai kontrolētiem avota datiem.

Saīsinājumi

Saīsinājums	Nozīme
AFE	Analogā priekšpakāpe / šūnu monitoringa priekšpakāpe
BMS	Bateriju pārvaldības sistēma
CMS/CMU	Šūnu/moduļu monitoringa sistēma / šūnu monitoringa ierīce
BDU	Bateriju atvienošanas ierīce
BTMS	Bateriju termiskās pārvaldības sistēma
DCIR	Līdzstrāvas iekšējā pretestība
ECM	Ekvivalentās shēmas modelis
EMS	Enerģijas pārvaldības sistēma
EOL	Kalpošanas laika beigas
HV	Augstspriegums
HVIL	Augstsprieguma bloķēšanas cilpa
IMD	Izolācijas uzraudzības ierīce
OCV	Atvērtās ķēdes spriegums
PCM	Fāzu pārejas materiāls
RMS	Vidējā kvadrātiskā vērtība
SOC	Uzlādes līmenis
SOE	Enerģijas līmenis
SOH	Veselības stāvoklis

Saīsinājums	Nozīme
SOP	Jaudas stāvoklis
TMS	Termiskās pārvaldības sistēma
VCU	Transportlīdzekļa vadības ierīce

Saturs

1. Mērķis, darbības joma un inženiertehniskais gala rezultāts
 2. Vispārējā funkcionālā arhitektūra un aprēķinu princips
 3. Universāls šūnas-moduļa-bloka topoloģijas un konfigurācijas mehānisms
 4. Inženiertehnisko datu modelis, parametru pārvaldība un izsekojamība
 5. Šūnu raksturošana, testu datu apstrāde un parametru identifikācija
 6. Šūnas elektriskās ekvivalentās shēmas modelis un stāvokļa vienādojumi
 7. Moduļa, bloka un augstsprieguma elektriskā tīkla modelis
 8. Paralēli slēgti bloki, daudzزارu bateriju sistēmas un sasaiste ar līdzstrāvas kopni
 9. BMS/CMS robežvērtību noteikšana, aizsardzība un kalibrēšanas izvaddatu ģenerators
 10. SOC, SOE, SOH un SOP novērtēšanas modeļi
 11. Dzelzceļa izmērīto darba ciklu imports un telemetrijas atkārtota izspēle
 12. Maršruta, vilciena un darba cikla sintēzes modelis
 13. Vilces motora, invertora, DC/DC, lādētāja un bremzēšanas modeļi
 14. Hibrīdā avota, ģenerators un uzlādes stratēģijas attēlojums
 15. Baterijas izmēru noteikšana un transportlīdzekļa/maršruta parametrizācija
 16. Nestacionārais termiskais modelis un siltuma izdalīšanās aprēķins
 17. Dzesēšanas plātnes, dzesēšanas šķidruma kontūra un hidrauliskais modelis
 18. Sildīšanas, dzesēšanas, siltumizolācijas un vides robežnosacījumu modeļi
 19. Saistītais elektrotermiskais risinātājs un skaitliskās prasības
 20. Kļūmju, degradētā režīma un drošā stāvokļa simulācija
 21. Novecošana, degradācija un kalpošanas laika enerģijas novērtējums
 22. Jūtīguma, nenoteiktības un Montekarlo analīze
 23. Optimizācija un projektēšanas telpas izpēte
 24. Lietotāja saskarne un inženiertehniskā darba plūsma
 25. Ievaddatu/izvaddatu shēmas un sadarbība
 26. Modeļu rezultāti un inženiertehniskie eksporta dati
 27. Verifikācija, validācija un modeļa ticamība
 28. Pieņemšanas testu kopums
 29. Modeļu aprēķinu veikspēja un modeļu failu kvalitāte
 30. Izpildītāja nodevumi un nodošana
- A pielikums. Šūnu ievades parametru vārdnīca
- B pielikums. Moduļu/bloku/topoloģijas parametru vārdnīca
- C pielikums. BMS/CMS kalibrēšanas izvaddatu vārdnīca
- D pielikums. Termisko/hidraulisko parametru vārdnīca
- E pielikums. Kanoniskais dzelzceļa darba ciklu reģistrs
- F pielikums. Minimālie pieņemšanas scenāriji
- G pielikums. Detalizētas parametru identifikācijas un modeļa kalibrēšanas prasības
- H pielikums. Detalizēta BMS/CMS karšu ģenerēšanas un aizsardzības loģika
- I pielikums. Detalizēti termiskās pārvaldības izmēru noteikšanas aprēķini

1. Mērķis, darbības joma un inženiertehniskais gala rezultāts

Iepirkums aptver savstarpēji sasaistītu termālo un elektrisko simulācijas modeļu kopuma izstrādi, verifikāciju, dokumentēšanu un nodošanu modulārām dzelzceļa vilces bateriju sistēmām.

Modeļiem jābūt vispārīgiem un parametru vadītiem, nevis fiksētam kalkulatoram, kas piesaistīts vienam produktam. Lietotājam jāspēj no parametru datiem izveidot jaunu šūnas, moduļa, bloka, bateriju sistēmas un transportlīdzekļa konfigurāciju, sasaistīt šo konfigurāciju ar izmērītu vai sintezētu dzelzceļa darba ciklu un iegūt laika apgabala elektriskos, termiskos, enerģijas, BMS/CMS un transportlīdzekļa veiktspējas rezultātus.

Modeļiem jāaptver pilna ķēde no šūnu raksturošanas līdz transportlīdzekļa maršruta simulācijai. Tiem vienā sinhronizētā aprēķinu ietvarā jāapvieno šūnas elektroķīmiskā/elektriskā uzvedība, topoloģija, kopņu un kontaktu pretestība, bloka ierobežojumi, BMS/CMS ierobežojumi, siltuma izdalīšanās un siltuma pārnese, dzesēšanas šķidrums hidraulika, jaudas elektronika, vilces pieprasījums, rekuperatīvā bremzēšana, vides apstākļi, kļūmes un nenoteiktība.

EMS jaudas sadales stratēģijas (§14.2) un BMS/CMS kalibrēšanas izvaddati (§9) ir simulācijas vides simulācijas un kalibrēšanas datu funkcijas. Transportlīdzeklī izmantojamas iegultās EMS vai BMS vadības programmatūras izstrāde neietilpst šajā iepirkumā.

Jebkura atsauce šajā Tehniskajā specifikācijā uz konkrētu standartu, tehnoloģiju, datņu formātu, programmēšanas valodu, programmatūru, ražotāju vai zīmolu ir lasāma ar vārdiem “vai ekvivalents”; ir pieļaujams ekvivalents risinājums ar vismaz tādu pašu funkcionalitāti.

1.1 Nepieciešamie inženiertehniskie lietojumi

- Izveidot un uzturēt patvaļīgu bateriju šūnu un ķīmisko sastāvu bibliotēku, izmantojot piegādātāju datus, laboratorijas datus vai lietotāja definētus inženiertehniskos pieņēmumus.
- Izveidot patvaļīgus moduļus, izmantojot jebkuru virknes/paralēlo slēgumu, ko atbalsta izvēlētajā šūnu monitoringa arhitektūra, tostarp virknē slēgtas šūnas, paralēlas šūnu grupas, paralēlas virknes vai citu lietotāja definētu grupēšanas loģiku.
- Izveidot patvaļīgus blokus no moduļiem, apakšmoduļiem, paplātēm, apakšblokiem vai citām hierarhiskām vienībām; hierarhija nedrīkst būt ierobežota ar fiksētu līmeņu skaitu.
- Izveidot transportlīdzekļa sistēmas ar vairākiem blokiem, kas satur no 1 līdz vismaz 12 neatkarīgi aizsargātiem bateriju zariem, kuri pieslēgti kopējai līdzstrāvas kopnei virknē, paralēli, caur DC/DC pārveidotājiem vai kā neatkarīgi komutējami avoti.
- Simulēt paātrināšanos, vienmērīgu kustību, kustību pēc inerces, stāvēšanu pieturās, uzlādi, rekuperatīvo bremzēšanu, dinamisko/reostatisko bremzēšanu, atkārtotus ciklus, kustības virziena maiņu maršrutā, slīpumus, ekstremālus vides apstākļus un degradētus darbības stāvokļus.
- Noteikt BMS/CMS robežvērtības un kalibrēšanas kartes no šūnu datiem un inženiertehniskajām rezervēm, nevis ievadīt tikai vienu maksimālo strāvu vai spriegumu.
- Aprēķināt termiskās pārvaldības prasības, tostarp šūnu siltuma izdalīšanos, temperatūras gradientus modulī, dzesēšanas plātņu slodzi, dzesēšanas šķidrums plūsmu, spiediena kritumu, sildītāja jaudu, dzesētāja/saldēšanas iekārtas slodzi, laiku līdz darba gatavībai un diennakts palīgsistēmu enerģijas patēriņu.
- Parametrizēt bateriju izvēlētajam transportlīdzeklī un maršrutam un kvantitatīvi novērtēt darbības attālumu, izmantojamo enerģiju, ilgstošo un īslaicīgo jaudas spēju, rekuperācijas enerģijas uzņemšanas spēju, termiskos ierobežojumus, līdzstrāvas kopnes uzvedību un rezerves robežas.
- Salīdzināt alternatīvas šūnas, topoloģijas, dzesēšanas koncepcijas, siltumizolācijas koncepcijas un vadības stratēģijas, izmantojot identiskus darba ciklus un pieņemšanas metrikas.
- Eksportēt §26 norādītos rezultātus turpmākai detalizētai baterijas projektēšanai, BMS/CMS konfigurēšanai, saziņai ar piegādātājiem un testēšanai.

1.2 Nepieciešamais gala rezultāts

Galīgajam nodevumam jābūt atkārtoti izmantojamai inženiertehniskai lietojumprogrammai ar rediģējamiem avota modeļiem/pirmkodu, parametru failiem, aprēķinu dokumentāciju, lietotāja saskarni, pakešapstrādes/API iespējām un validācijas gadījumiem. Aizsargāta izklājlapa, savstarpēji nesaistītu aprēķinu lapu kopums vai “melnās kastes” izpildāmais fails bez rediģējamiem modeļiem un pirmkoda nav pieņemams.

Modeļiem jābūt deterministiskiem pie deterministiskiem ievaddatiem. Katrai simulācijai jābūt reproducējamai no scenārija faila, kas satur modeļa versiju, šūnu datu kopas versiju, topoloģiju, transportlīdzekļa/maršruta datu kopas versiju, risinātāja iestatījumus, kalibrēšanas versiju un varbūtiskiem aprēķiniem (§22) – nejaušības sēklu (random seed).

2. Vispārējā funkcionālā arhitektūra un aprēķinu princips

Modeļu kopumam jābūt organizētam kā savstarpēji saistītiem, bet neatkarīgi testējamiem apakšmodeļiem. Katram apakšmodelim jābūt skaidri definētiem ievaddatiem, izvaddatiem, mērvienībām un derīguma diapazoniem. Lietotājam jāspēj izpildīt atsevišķus apakšmodeļus inženiertehniskām pārbaudēm un izpildīt pilno saistīto modeli transportlīdzekļa darba cikla simulācijām.

2.1 Funkcionālie apakšmodeļi

Apakšmodelis	Galvenais mērķis	Galvenie sasaistītie mainīgie
Šūnu dati un parametru identifikācija	Pārveidot neapstrādātas piegādātāja/laboratorijas līknes validētos modeļa parametrus un kartēs	OCV, kapacitāte, DCIR, RC parametri, termiskās īpašības, strāvas ierobežojumi, novecošanas dati
Šūnas elektriskais ECM	Dinamiski aprēķināt šūnas spaiļu spriegumu, polarizāciju, SOC/SOE un zudumus	Strāva, spriegums, SOC, temperatūra, stāvokļa mainīgie
Topoloģija/ elektriskais tīkls	Mērogot šūnas uzvedību uz moduļiem/blokiem un aprēķināt zaru strāvas un zudumus	Virknes/paralēlā slēguma topoloģija, vadītāju pretestība, kontaktori, drošinātāji, bloku zaru stāvokļi
BMS/CMS modelis	Aprēķināt dinamiski pieļaujamo uzlādes/izlādes/rekuperācijas jaudu un aizsardzības reakcijas	Šūnas/bloka spriegums, strāva, temperatūra, SOC/SOH/SOP, sensoru stāvokļi
Termiskais modelis	Aprēķināt siltuma izdalīšanos un temperatūras stāvokļus	Šūnu zudumi, dzesēšanas šķidruma temperatūra/plūsma, apkārtējā vide, siltumvadīšana/konvekcija/starojums
Dzesēšanas šķidruma/hidrauliskais modelis	Aprēķināt plūsmas sadalījumu, spiediena kritumu, sūkņa darba punktu un siltuma transportu	Plūsma, spiediens, dzesēšanas šķidruma īpašības, kanālu ģeometrija, siltuma slodze
Dzelzceļa darba cikla modelis	Generēt vai atkārtoti izspēlēt laikā izšķirtu vilces/bremzēšanas pieprasījumu	Ātrums, slīpums, masa, paātrinājums, jauda pie riteņiem, palīgsistēmu slodzes
Jaudas elektronikas modelis	Pārreķināt riteņa/vārpstas un avotu jaudas līdzstrāvas kopnes/baterijas jaudās	Lietderības koeficienta kartes, griezes momenta/apgriezienu ierobežojumi, kopnes spriegums, strāvas ierobežojumi
Transportlīdzekļa/EMS modelis	Vadīt jaudas sadali starp bateriju un citiem enerģijas avotiem	Pieprasītā vilces jauda, SOC mērķvērtības, uzlādes stratēģija, ģeneratora/kurināmā elementa ierobežojumi
Kļūmju/nenoteiktības modelis	Piemērot komponentu kļūmes, sensoru kļūdas, parametru izkliedi un degradētos režīmus	Kļūmes stāvoklis, jaudas ierobežošana (derating), izolēšana, zaru pieejamība, nenoteiktības sadalījumi

2.2 Sasaiste un laika bāze

- Galvenajam simulācijas pulkstenim jānodrošina lietotāja izvēlams bāzes solis no 0.05 s līdz vismaz 10 s, ar mazākiem iekšējiem apakšsoļiem, ja to prasa skaitliskā stabilitāte vai ātrdarbīgā aizsardzības loģika.
- Importētās telemetrijas laika zīmogi jā saglabā. Jebkurai pārdiskretizācijai jābūt skaidri norādītai, lietotāja izvēlamai, reģistrētai žurnālā un atgriezeniskai.
- Katrā sasaistes solī jānodrošina elektrisko stāvokļu, termisko stāvokļu, BMS ierobežojumu, jaudas elektronikas ierobežojumu un transportlīdzekļa jaudas pieprasījuma apmaiņu. Modelis nedrīkst piemērot termisko ierobežojumu tikai pēc elektriskās simulācijas pabeigšanas.
- Jānodrošina notikumu vadīta loģika kontakto darbibai, priekšuzlādes pabeigšanai, nostrādes sliekšņiem, histerēzei, kontaktu atsietas novēršanas (debounce) taimeriem, kļūmju fiksācijai (latching), bloku izolēšanai, bloku atkārtotai pieslēgšanai un režīmu pārejām.
- Visos iekšējos aprēķinos jāizmanto SI mērvienības. Lietotāja saskarne var attēlot inženiertehniskās mērvienības, piemēram, km/h, kWh, L/min, bar, °C un ‰.

3. Universāls šūnas-moduļa-bloka topoloģijas un konfigurācijas mehānisms

Topoloģijas mehānisms ir centrāla prasība. Modeļu pirmkoda failos nedrīkst būt iestrādāts fiksēts virknē slēgto elementu skaits, moduļu skaits, šūnu skaits, bloku skaits vai bloka spriegums. Lietotājam jāveido topoloģija, definējot hierarhiskus komponentus un to savienojumus. Modelim jāaprēķina visi atvasinātie nominālie un ierobežojošie elektriskie lielumi no lietotāja definētās struktūras.

3.1 Atbalstītā hierarhija

Hierarhijai jāatbalsta vismaz: šūna → paralēla šūnu grupa → modulis → apakšbloks/paplāte → bloks → transportlīdzekļa bateriju zars → kopējā līdzstrāvas kopne. Lietotājam jāspēj izlaist neizmantotos hierarhijas līmeņus. Papildu hierarhijas līmeņiem jābūt iespējamiem, izmantojot vispārīgas ligzdotas komponentu definīcijas vai līdzvērtīgu pieeju.

3.2 Lietotāja konfigurējamie topoloģijas parametri

- Virknē slēgto šūnu skaits katrā elektriskajā grupā.
- Paralēli slēgto šūnu skaits katrā grupā un paralēlo virkņu skaits.
- Virknē un/vai paralēli slēgto moduļu skaits.
- Apakšbloku/paplāšu skaits un to virknes/paralēlais slēgums.
- Transportlīdzekļi uzstādīto pilno bloku vai zaru skaits.
- Bloku savienojuma veids: tiešs paralēlais slēgums, tiešs virknes slēgums, virknes-paralēlais tīkls, neatkarīgi DC/DC zari, komutējami zari vai lietotāja definēts savienojumu grafs.
- Bloka drošinātāju, moduļa drošinātāju, galveno kontakto, priekšuzlādes ķēžu, manuālo servisa atvienotāju, strāvas sensoru, kopņu stienju, savienotāju, kabeļu posmu un izolēšanas ierīču esamība un atrašanās vieta.
- Moduļu izolēšanas vai apvada (bypass) ierīces (modelim tās jāatbalsta; lietotājs katrai konfigurācijai nosaka, vai tās ir uzstādītas), tostarp noteikumi aktīvo virknē slēgto elementu skaita pārrēķināšanai un savietojamai paralēlo zaru pieslēgšanai.
- Šūnu monitoringa kanālu grupēšana, temperatūras sensoru grupēšana un komunikācijas hierarhija BMS/CMS aprēķiniem.
- Sadalītas instalācijas, kurās fiziski atsevišķi bloki vai apakšbloki atrodas atšķirīgos apkārtējās vides/dzesēšanas šķidrums apstākļos.

3.3 Atvasinātie topoloģijas aprēķini

$N_{s,eq}$ = kopējais virknē slēgto elektriski aktīvo šūnu sprieguma elementu skaits

$N_{p,eq}$ = ekvivalentais šūnu skaits, kas paralēli daļa zara strāvu

$V_{nom,pack} = \sum V_{nom,cell,k}$ pa aktīvo virknes ceļu

$Q_{nom,pack} = Q_{nom,cell} \times N_{p,eq}$ [Ah]

$$E_{\text{nom,pack}} = \Sigma(V_{\text{nom,group}} \times Q_{\text{nom,group}}) \quad [\text{Wh}]$$

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{branch}} / N_{\text{p,local}}$$

Strāvas sadalījums jāaprēķina lokālās paralēlās grupas līmenī. Paralēlām šūnām vai virknēm ar atšķirīgu pretestību nedrīkst piespiestu kārtā noteikt vienādu strāvu, ja vien lietotājs neizvēlas idealizētu režīmu.

$$P_{\text{pack}}(t) = V_{\text{pack}}(t) \times I_{\text{pack}}(t)$$

Neidentiskām paralēlām virknēm modelim jāaprēķina strāvas sadalījums no zaru atvērtās ķēdes spriegumiem un dinamiskajām impedancēm. Tādējādi kapacitātes, pretestības, SOC, SOH un temperatūras izkliedei starp virknēm jāietekmē strāvas sadalījums un termiskā slodze.

3.4 Topoloģijas derīguma pārbaudes

- Brīdināt, ja konfigurētais maksimālais bloka spriegums pārsniedz lietotāja ievadītos komponentu nominālos spriegumus.
- Brīdināt, ja BMS/CMS kanālu skaits ir nepietiekams konfigurētajam uzraudzīto šūnu grupu skaitam.
- Brīdināt, ja virknē slēgtiem blokiem/moduļiem ir nesavietojamas nominālās kapacitātes vai konfigurētie SOC logi.
- Brīdināt, ja tiešā paralēlā slēgumā esošus zarus var savienot ar lietotāja definētu sprieguma/SOC nesakritību, kas pārsniedz konfigurējamu pieļaujamo sliekšni.
- Aprēķināt topoloģijas minimālo un maksimālo līdzstrāvas kopnes spriegumu lietotāja definētajā šūnu sprieguma diapazonā un pie aktīvo moduļu stāvokļiem.
- Aprēķināt strāvu, kas plūst caur katru drošinātāju, kontaktoru, vadītāju, savienotāju un kopnes posmu visos definētajos zarus.
- Aprēķināt no topoloģijas atkarīgos īslaicīgos un ilgstošos jaudas ierobežojumus un identificēt ierobežojošo komponentu.
- Saglabāt gan fizisko topoloģiju, gan aktīvo topoloģiju, lai izolētie/apvadītie moduļi paliktu uzraudzīti arī tad, ja tie ir izslēgti no vilces ķēdes.

4. Inženiertehnisko datu modelis, parametru pārvaldība un izsekojamība

Visi aprēķinu ievaddati jāglabā uz shēmu balstītā parametru datubāzē. Ķīmiskā sastāva nosaukums ir tikai metadati; modeļa uzvedībai jābūt noteiktai ar izvēlētajai šūnai ievadītajām skaitliskajām īpašībām, kartēm, vienādojumiem un ierobežojumiem. Jaunu šūnu jāvar pievienot bez pirmkoda izmaiņām.

4.1 Datu statuss un izcelsme

Datu statuss	Definīcija	Nepieciešamā apstrāde
Izmērīts	Tiešs laboratorijas vai transportlīdzekļa mērījums	Saglabāt avota failu, testa nosacījumus, paraugu skaitu, testa datumu un nenoteiktību (nenoteiktību var atstāt tukšu).
Piegādātāja specifikācija	Publicēta vai tieši sniegta ražotāja vērtība	Saglabāt avota dokumentu un derīguma nosacījumus.
Aproksimēts	Ar modeļa pielāgošanu (fitting) iegūts parametrs	Saglabāt pielāgošanas metodi, mērķfunkciju, datu kopu un pielāgojuma kvalitātes rādītājus.
Atvasināts	Aprēķināts no citām kontrolētām vērtībām	Saglabāt formulu un avota parametru versijas.
Pieņemts	Inženiertehniskais pieņēmums datu trūkuma dēļ	Nepieciešams nepārprotams lietotāja apstiprinājums; iekļaut pārskatos un jutīguma analizē.
Novērtēts pēc analoga komponenta	Pārņemts vai mērogots no cita konstruktīvā risinājuma	Glabāt atsevišķi no mērītajiem datiem un pieprasīt ticamības pakāpi.

4.2 Obligātie metadati katram parametram/kartei

- Parametra nosaukums un unikāla iekšējā atslēga.
- Apraksts un fizikālā nozīme.
- SI mērvienība un attēlošanas mērvienība.
- Avota veids un atsauce uz avotu.
- Piemērojamā šūnu ķīmija/šūna/komponents.
- Testēšanas vai ekspluatācijas apstākļi.
- Derīgais diapazons katram no lielumiem – SOC, temperatūra, spriegums, strāva, C-rate, frekvence un laiks –, no kuriem parametrs vai karte ir atkarīga.
- Interpolācijas metode un ekstrapolācijas noteikums.
- Nenoteiktība/pielaide vai varbūtību sadalījums (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, vērtība §22 nenoteiktības analizē tiek uzskatīta par precīzu).
- Redakcija/versija un izmaiņu vēsture.

4.3 Interpolācija un ekstrapolācija

Interpolācijai jābūt ierobežotai un caurskatāmai. Divdimensiju vai trīsdimensiju kartēm modelim jānorāda izmantotais interpolācijas algoritms (piemēram, bilineārā, bikubiskā, Delaunay vai pa daļām lineārā interpolācija). Ekstrapolācijai ārpus validētās kartes pēc noklusējuma jābūt atspējotai. Ja lietotājs iespējo ekstrapolāciju, modelim jāatzīmē visi ietekmētie laika paraugi un jākvantificē tā simulētā darbības laika daļa, kas atrodas ārpus validētā apgabala.

4.4 Obligātie ievaddati un ievaddati, kurus var atstāt tukšus

Izpildītājam jārealizē visi šajā Tehniskajā specifikācijā aprakstītie ievaddati, funkcijas un izvaddati. Katram ievades laukam šajā Tehniskajā specifikācijā norādīts, vai tas ir obligāts vai lietotājs to “var atstāt tukšu” (sk. īpaši §5.1, §11.1, §12.2 un A pielikumu). Ja lietotājs ievades lauku atstāj tukšu, modelim jāpiemēro šajā Tehniskajā specifikācijā noteiktā noklusējuma vērtība vai, ja tāda nav noteikta, jāizslēdz atkarīgais aprēķins, un tas jānorāda rezultātos. Vārdi “var atstāt tukšu” un “var iestatīt uz nulli” attiecas tikai uz lietotāja ievadītajiem datiem, nevis uz Izpildītāja pienākumu realizēt attiecīgo funkciju.

5. Šūnu raksturošana, testēšanas datu apstrāde un parametru identifikācija

Šūnu datu modulim jāpieņem gan apkopotas šūnu specifikācijas, gan neapstrādātas testēšanas laikrindas. Tam jāpārveido §5.1 un A pielikumā norādīto veidu piegādātāja un laboratorijas dati parametros, kas nepieciešami elektriskajam, BMS un termiskajam modelim. Modelis nedrīkst prasīt konkrētu šūnu ķīmiju un nedrīkst pieņemt, ka šūnai ir plakana vai monotona sprieguma līkne.

5.1 Minimālie atbalstāmie šūnu dati

- Nominālā un deklarētā (rated) ietilpība [Ah], nominālā enerģija [Wh], nominālais spriegums un izmantojamais sprieguma diapazons.
- Uzlādes un izlādes sprieguma robežas, brīdinājuma/aizsardzības robežas (var atstāt tukšu) un piegādātāja ieteiktais darbības SOC logs.
- OCV-SOC dati uzlādei un izlādei jebkuram temperatūru skaitam (vismaz vienai), tostarp histerēze (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, tiek izmantota viena OCV līkne).
- Ietilpības saglabāšanās atkarībā no temperatūras un no izlādes/uzlādes ātruma.
- Līdzstrāvas pretestība atkarībā no SOC, temperatūras, strāvas virziena un impulsa ilguma.
- Maiņstrāvas pretestības vai impedances dati, tostarp EIS spektri (var atstāt tukšu).
- Pielājumā uzlādes strāva atkarībā no SOC un temperatūras, tostarp ilgstošās un impulsa robežas.
- Pielājumā rekuperatīvās uzlādes strāva (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, tiek izmantota parastās uzlādes spēja).
- Pielājumā izlādes strāva atkarībā no SOC un temperatūras ilgstošā režīmā un jebkuram impulsa ilgumu skaitam (vismaz vienam).

- Šūnas masa, izmēri, virsmas laukumi, materiālu uzbūve (var atstāt tukšu), siltumietilpība, efektīvā siltumvadītspēja un anizotropijas parametri (anizotropiju var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, tiek izmantota izotropa siltumvadītspēja).
- Entropijas koeficients $dOCV/dT$ atkarībā no SOC (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, atgriezeniskais siltums ir nulle, un rezultātos tas tiek norādīts, sk. §16.1).
- Pašizlādes, kulonu efektivitātes, enerģijas efektivitātes un histerēzes dati (katru var atstāt tukšu; noklusējuma vērtības: pašizlāde 0, kulonu efektivitāte 1,0, enerģijas efektivitāte tiek aprēķināta no ECM, histerēzes nav).
- Cikliskā un kalendārā kalpošanas laika dati, tostarp testēšanas temperatūra, DOD, SOC logs, C-rate, miera periodi un kalpošanas laika beigu kritērijs.
- Ekstremālas slodzes (abuse) testu novērojumus drīkst saglabāt inženiertehniskai uzziņai, taču standarta darbības modelis nedrīkst secināt drošas darbības robežas tieši no ekstremālas slodzes testu galapunktiem bez nepārprotamas lietotāja veiktas kalibrēšanas.

5.2 Neapstrādātu testēšanas datu imports

Lietotājam jābūt iespējai importēt CSV/XLSX vai līdzvērtīga formāta tabulāras laikrindas, kas satur laiku, strāvu, spriegumu, temperatūru un papildu kanālus pēc izvēles. Importēšanas rīkam jāatbalsta vairākas testa lapas/datnes un kolonnu piesaistes vednis. Zīmju konvencijai, mērvienībām, sensoru nobīdēm un testa metadatiem jābūt skaidri definētiem, pirms dati tiek pieņemti.

5.3 OCV-SOC iegūšana

Modelim jānodrošina OCV-SOC datu imports no piegādātāja tabulām un to iegūšana no testiem ar zemu C-rate vai relaksācijas testiem. Ja ir iesniegtas atsevišķas uzlādes un izlādes OCV līknes, jāsavienā abas. Vienu vidējotu OCV līkni drīkst izmantot tikai kā lietotāja izvēlamu vienkāršojumu.

$$SOC(t) = SOC(t_0) - (1/Q_{ref}) \int \eta_I(T, SOC, I) \cdot I(t) dt$$

Pozitīva strāva atbilst izlādei. Uzlādes strāva ir negatīva. Zīmju konvencijai jābūt vienotai visā modelī.

5.4 DCIR un impulsu raksturošana

$$R_{DC}(\Delta t) = [V(t_0-) - V(t_0+\Delta t)] / \Delta I$$

Modelim jānodrošina pretestības noteikšana lietotāja definētiem impulsu ilgumiem. Jāreģistrē zīme un laika atskaites punkts.

Ja uzlādes un izlādes pretestības atšķiras, jāsavienā atsevišķas kartes. Modelim jāatbalsta pretestība kā funkcija $R_0(SOC, T, SOH, dir, |||)$; ja datos nav strāvas atkarības, R_0 tiek izmantota bez $|||$ atkarības, un rezultātos tas tiek norādīts. Retas datu kopas jāinterpolē, uzrādot redzamas ticamības robežas.

5.5 Ekvivalentās shēmas parametru identifikācija

Divu RC posmu Thevenin modelis ir minimālais primārais dinamiskais elektriskais modelis. Modeļa pielāgošanas procedūrai jāidentificē R_0 , R_1 , C_1 , R_2 un C_2 , izmantojot impulsu vai dinamiskos datus. Viena RC posma modeli drīkst saglabāt aprēķinu salīdzināšanai, taču piegādātajam noklusējuma modelim jāatbalsta divi dinamiskie polarizācijas stāvokļi. Izpildītājs drīkst nodrošināt augstākas kārtas vai fizikāli pamatotas alternatīvas, ja tās paliek lietotāja konfigurējamās un neaizstāj prasīto caurskatāmo ECM.

- Pielāgošanai jābūt iespējamai neatkarīgi vairākos SOC un temperatūras punktos.
- Optimizācijas rezultātos jānorāda RMSE, maksimālais sprieguma atlikums, normalizētā kļūda un ticamības intervāli.
- Modelim jānodrošina parametru izlīdzināšana pa SOC un temperatūru kā lietotāja iestatījums (pēc noklusējuma – izslēgta); neapstrādātie pielāgotie punkti vienmēr jāsavienā.
- Pielāgotajiem parametriem jābūt ierobežotiem fizikāli jēgpilnās zīmēs un diapazonos.
- Modelim jāatzīmē parametru apgabali, kurus pamato tikai ekstrapolācija vai nepietiekami dati.

- Validācijai jāizmanto testēšanas dati, kas nav izmantoti pielāgošanai, visos gadījumos, kad šādi dati ir iesniegti.

6. Šūnas elektriskās ekvivalentās shēmas modelis un stāvokļa vienādojumi

6.1 Prasītais primārais ECM

$$V_t = OCV(SOC, T, SOH, h) - I \cdot R_0(SOC, T, SOH, dir) - V_1 - V_2$$

$$dV_1/dt = -V_1/(R_1 \cdot C_1) + I/C_1$$

$$dV_2/dt = -V_2/(R_2 \cdot C_2) + I/C_2$$

$$dSOC/dt = -\eta_I(SOC, T, I, SOH) \cdot I / Q_{avail}(T, SOH)$$

Realizācijai jāatbalsta atsevišķa uzlādes/izlādes efektivitāte un jāļauj OCV funkcijā iekļaut histerēzes stāvokli h , ja ir ievadīti histerēzes dati (§5.1). SOC jāierobežo atbilstoši konfigurētajai ietilpības definīcijai, taču aizsardzības loģikai galvenokārt jābalstās uz spriegumu, strāvu un temperatūru, nevis tikai uz SOC.

6.2 Skaitliskais risinājums

- Izmantot skaitliski stabilu precīzu diskretizāciju lineārajiem RC zariem vai validētu ODE integrēšanas metodi.
- Nodrošināt lietotāja izvēlamu elektriskās integrēšanas soli un automātisku soļa dalīšanu ātru pārejas procesu laikā.
- Saglabāt stāvokļu nepārtrauktību strāvas zīmes maiņā, stāvēšanas periodu un rekuperācijas notikumu laikā.
- Inicializēt polarizācijas stāvokļus, pamatojoties uz miera stāvokļa pieņēmumiem vai lietotāja iesniegtu iepriekšējā stāvokļa datni.
- Atbalstīt simulācijas atsākšanu (warm restart) no saglabāta elektriskā/termiskā/BMS stāvokļa.

6.3 Slodzes sprieguma ierobežojumi un jaudas pieejamība

Risinātājam jāaprēķina pieļaujamā strāva, ņemot vērā apvienoto strāvas karti, slodzes sprieguma ierobežojumus, aparātūras robežas un termisko/BMS jaudas ierobežošanu (derating). Risinātājs nedrīkst jaudas pieprasījuma pārrēķināšanai strāvā vienkārši izmantot bloka nominālo spriegumu.

$$V_{min} \leq V_t(I, SOC, T, state) \leq V_{max}$$

$$P_{req} = V_t(I) \cdot I$$

Pieprasītajai jaudai risinātājam jāatrisina nelineārā vai kvadrātiskā sakarība starp strāvu un slodzes spriegumu. Ja realizējama risinājuma nav, jauda jāsamazina līdz maksimālajai realizējamajai vērtībai un jāreģistrē ierobežojošais nosacījums.

6.4 Enerģijas bilance

$$E_{terminal} = \int V_t I dt$$

$$E_{OCV} = \int OCV I dt$$

$$E_{loss, ohmic} = \int I^2 R_0 dt$$

$$E_{loss, pol} = \int I(V_1 + V_2) dt$$

Enerģijas bilancei katrā simulācijā jābūt skaitliski noslēgtai, un jāuzrāda atlikuma kļūda. Uzlādes un izlādes efektivitātei jābūt pieejamai šūnas, moduļa, bloka, līdzstrāvas kopnes un maršruta līmenī.

7. Moduļa, bloka un augstsprieguma elektriskā tīkla modelis

Elektriskā tīkla modelim jāpārveido šūnas uzvedība pilnā bateriju zara modelī, saglabājot lokālo strāvas, sprieguma, jaudas un zudumu informāciju. Koncentrēto parametru mērogošana ir pieļaujama tikai tad, ja konfigurācija ir elektriski viendabīga un lietotājs to nepārprotami izvēlas. Nevienādīgiem zariem tīkla modelim jāaprēķina lokālie stāvokļi.

7.1 Komponentu modeļi

Komponents	Minimālais atveidojums
Kopņu stieņi / kabeļi	No temperatūras atkarīga vai lietotāja definēta pretestība; garuma/šķērsgriezuma/materiāla izvēle; I^2R zudumi.
Savienotāji	Kontakta pretestība, kā arī nominālā strāva un temperatūra.
Drošinātājs	Pretestība aukstā stāvoklī, temperatūras atkarība (var atstāt tukšu), ilgstošā nominālā strāva un I^2t / laika-strāvas raksturlīkne (var atstāt tukšu).
Galvenais kontaktors	Pretestība saslēgtā stāvoklī, nominālā strāva/spriegums, palīgkontakta stāvoklis un atvēršanas/saslēgšanas loģika.
Priekšuzlādes kontaktors/rezistors	Pretestība, nominālā jauda/enerģija, laika parametri un siltumenerģija katrā notikumā.
Manuālais servisa atvienotājs	Virknē slēgtā pretestība un stāvoklis.
Strāvas sensors	Diapazons, precizitāte, nobīde, troksnis un aizkave (aizkavi var iestatīt uz nulli).
Sprieguma sensors	Diapazons, precizitāte, sistemātiskā nobīde un filtrēšana (filtra laika konstanti var iestatīt uz nulli).
IMD/HVIL	Loģiska drošības ieeja ar konfigurējamu aizkavi un reakciju.
Moduļa apvads / atslēgšana	Elektriskais stāvoklis, palīgatgriezeniskā saite, pieļaujamā komutācijas secība un aktīvās topoloģijas atjaunināšana.

7.2 Bloka spriegums un zara pretestība

$$V_{\text{pack}} = \sum V_{\text{group}} - I_{\text{pack}} \cdot R_{\text{distribution}} - \sum V_{\text{component_drop}}$$

$$R_{\text{distribution}} = R_{\text{bus}} + R_{\text{cable}} + R_{\text{connector}} + R_{\text{contactors}} + R_{\text{fuse}} + R_{\text{service}} + \dots$$

Sadales zudumi jāiekļauj gan spaiļu spriegumā, gan siltuma slodzē. Lietotājam jābūt iespējai piešķirt daļu komponentu siltuma bateriju korpusam, ārējai kabeļu telpai vai citam termiskajam mežglam.

7.3 Priekšuzlāde

$$V_{\text{bus}}(t) = V_{\text{pack}} \cdot [1 - \exp(-t/(R_{\text{pre}} \cdot C_{\text{bus}}))] \quad \text{ideālajam atskaites gadījumam}$$

$$I_{\text{pre}}(t) = (V_{\text{pack}} - V_{\text{bus}})/R_{\text{pre}}$$

Pilnajā modelī jāiekļauj bloka iekšējā pretestība, līdzstrāvas starpķēdes (DC-link) kapacitāte, paralēlo zaru stāvokļi un pārveidotāja noplūde, ja tie ir konfigurēti. Modelim jāaprēķina priekšuzlādes maksimālā strāva, rezistora enerģija, priekšuzlādes laiks, sprieguma starpības atļaujas nosacījums, laika limits un kļūmju gadījumi, piemēram, sametināts kontaktors vai pārtraukts rezistors.

7.4 Šūnu un paralēlo grupu parametru izkliede

Lietotājam jābūt iespējai piešķirt statistisku sadalījumu vai deterministiskas nobīdes ietilpībai, R_0 , OCV, pašizlādei un sākotnējam SOC. Paralēli slēgtām šūnām/virknēm strāvas sadalījums jāaprēķina no elektriskajiem stāvokļiem. Virknē slēgtām šūnām modelim jāseko katras šūnas spriegumam, ja lietotājs iespējo simulāciju šūnu līmenī, ļaujot noteikt pirmo šūnu, kas sasniedz aizsardzības sliekšni.

8. Paralēli bloki, daudzzaru bateriju sistēmas un līdzstrāvas kopnes savienojums

Modelim jāatbalsta no 1 līdz vismaz 12 neatkarīgi aizsargātiem bateriju zariem, kas pievienoti kopīgai līdzstrāvas kopnei. Katram zaram var būt atšķirīgs šūnu tips, topoloģija, ietilpība, SOC,

SOH, temperatūra, pretestība un pieejamības stāvoklis. Mērķis ir modelēt gan normālu paralēlu darbību, gan nesakritības/degradētas darbības gadījumus (§8.3, §20).

8.1 Tieši paralēli slēgtu zaru risinājums

Tieši paralēli slēgtiem zariem kopīgās kopnes spriegumam jāatbilst Kirhoha strāvu līdzsvaram. Zaram nedrīkst piešķirt fiksētu kopējās strāvas daļu, ja vien lietotājs neizvēlas idealizētu vienmērīgas sadales režīmu.

$$V_{\text{bus}} = E_k - I_k \cdot Z_k \quad \text{katram pievienotajam zaram } k$$

$$\sum I_k = I_{\text{bus}}$$

Zara ekvivalentajā avota spriegumā E_k un dinamiskajā impedancē Z_k jāiekļauj OCV/polarizācija, bloka sadales pretestība un attiecināmie jaudas elektronikas elementi. Strāvas virziena maiņa starp zariem jāpieļauj, ja tā ir fizikāli iespējama, un par to jāziņo kā par iekšējo cirkulāciju.

8.2 Bloku pieslēgšanas atļaujas nosacījumi

- Pārbaudīt polaritātes un topoloģijas saderību.
- Pārbaudīt sprieguma starpību starp kopni un bloku un aprēķināt paredzamo izlīdzināšanas strāvu pirms kontaktora saslēgšanas.
- Pārbaudīt SOC, temperatūras un aktīvo virknē slēgto elementu skaita nesakritību pret konfigurējamiem atļaujas nosacījumiem.
- Pārbaudīt izolācijas/HVIL/kontaktoru/priekšuzlādes statusu.
- Veikt priekšuzlādi neatkarīgi katram zaram, kuram konfigurēta sava priekšuzlādes ķēde.
- Noraidīt vai aizkavēt pieslēgšanu, ja prognozētā izlīdzināšanas strāva pārsniedz bloka vai kontaktora robežvērtību.
- Reģistrēt pieslēgšanas iemeslu, bloķēšanas iemeslu un laiku.

8.3 Vairāku bloku sistēmas darbība degradētā režīmā

Ja viens bloks ir atslēgts, simulācijā jāpārreķina atlikušo zaru strāvas un siltuma slodze, jaunā ilgstošā/maksimālā jaudas spēja, izmantojamā enerģija, maršruta veikšanas rezerve un līdzstrāvas kopnes spriegums. Ja zariem moduļu apvada dēļ ir nevienāds aktīvo virknē slēgto elementu skaits, modelim jānosaka, vai tieša paralēla pieslēgšana joprojām ir pieļaujama, un tas nedrīkst pieņemt, ka tā ir droša.

9. BMS/CMS robežvērtību noteikšana, aizsardzība un kalibrēšanas datu ģenerators

Šim apakšmodelim jāpārveido šūnu spēju dati, topoloģija, sensoru iespējas, aparatūras robežas, termiskās spējas un projekta drošības rezerves BMS/CMS kalibrēšanas datus. Tā izvaddatos jāietver visas §9.2 un C pielikumā norādītās kalibrēšanas datu grupas, nevis tikai nominālās vērtības.

9.1 Dinamiskie strāvas un jaudas ierobežojumi

Modelim jāaprēķina neatkarīgi izlādes, parastās uzlādes un rekuperatīvās uzlādes ierobežojumi. Katram no tiem jābūt vismaz SOC un šūnas temperatūras funkcijai un papildus SOH, šūnas sprieguma, impulsa ilguma, dzesēšanas šķidruma stāvokļa un aparatūras robežu funkcijai (modelim jāatbalsta visas šīs atkarības; lietotājs izvēlas, kuras ir aktīvas).

$$I_{\text{dis,max}} = \min(I_{\text{cell,map}}, I_{\text{Vmin}}, I_{\text{thermal}}, I_{\text{hardware}}, I_{\text{branch}}, I_{\text{sensor}}, I_{\text{user_margin}})$$

$$I_{\text{chg,max}} = \max(I_{\text{cell,chg,map}}, I_{\text{Vmax}}, I_{\text{thermal}}, I_{\text{hardware}}, I_{\text{user_margin}})$$

[negatīvās zīmes konvencija]

$$P_{\text{dis,max}} = V_{\text{loaded}}(I_{\text{dis,max}}) \cdot I_{\text{dis,max}}$$

$$P_{\text{regen,max}} = |V_{\text{loaded}}(I_{\text{chg,max}}) \cdot I_{\text{chg,max}}|$$

BMS robežvērtību aprēķinam jābalstās uz visierobežojošāko šūnas/moduļa/bloka stāvokli, ja ir iespējoti šūnu līmeņa dati. Bloka vidējā temperatūra vai SOC nedrīkst maskēt atsevišķas šūnas ierobežojumu.

9.2 Prasītās BMS/CMS kalibrēšanas parametru grupas

- Šūnas pārspriegums: brīdinājums, jaudas ierobežošanas (derating) sākums, kontrolēta apturēšana, aizsardzības atslēgšana un fiksētā (latched) atslēgšana (modelim jānodrošina visi pieci līmeņi; lietotājs projektam var atslēgt atsevišķus līmeņus); katram ar histerēzi un apstiprināšanas (debounce)/atbrīvošanas laiku.
- Šūnas zemspriegums: brīdinājums, jaudas ierobežošanas sākums, kontrolēta apturēšana, aizsardzības atslēgšana un fiksētā (latched) atslēgšana (modelim jānodrošina visi pieci līmeņi; lietotājs projektam var atslēgt atsevišķus līmeņus).
- Šūnas paaugstinātas un pazeminātas temperatūras robežas atsevišķi uzlādei, rekuperatīvajai uzlādei un izlādei.
- Bloka/moduļa paaugstinātas temperatūras un temperatūras izkliedes sliekšņi.
- Uzlādes strāvas, rekuperatīvās uzlādes strāvas un izlādes strāvas ierobežojumu kartes.
- Uzlādes/izlādes/rekuperācijas jaudas ierobežojumu kartes.
- Šūnas sprieguma izmaiņu ātruma un temperatūras izmaiņu ātruma diagnostikas sliekšņi.
- Bloka pārstrāves sliekšņi ilgstošai, īslaicīgai un momentānai aizsardzībai ar aizkaves/enerģijas kritērijiem.
- Īssavienojuma aizsardzības koordinācijas vērtības un saskarne ar drošinātāja/pirodrošinātāja/kontaktora stratēģiju (tiek aprēķinātas, ja ir ievadīti aparatūras dati; pretējā gadījumā rezultātos norāda, ka tās nav aprēķinātas).
- Balansēšanas iespējošanas/atspējošanas SOC un sprieguma diapazoni, sprieguma starpības sākuma/beigu sliekšņi, balansēšanas strāva, maksimālais darba cikls un termiskās bloķēšanas sliekšņi.
- SOC darbības logi, rezerves SOC, avārijas režīma (limp-home) rezerve un uzlādes mērķa logi.
- SOE un SOP ziņošanas parametri un laika horizonti.
- Sensoru ticamības pārbaudes, pārtrauktu vadu diagnostikas un dublēto mērījumu nesakritības robežvērtības.
- Bloka-kopnes priekšuzlādes sprieguma starpības atļaujas nosacījums, priekšuzlādes laika limits, minimālā/maksimālā strāva un sametināta/nesaslēdzoša kontaktora diagnostika.
- Bloku paralēlas pieslēgšanas atļaujas nosacījumi attiecībā uz sprieguma/SOC/temperatūras/aktīvās topoloģijas nesakritību.
- Dzesēšanas šķidruma ieplūdes/izplūdes temperatūras robežas, minimālā plūsma, anomāla spiediena/spiediena krituma diagnostika, dzesētāja/sildītāja pieprasījuma sliekšņi un termiskās jaudas ierobežošanas (derating) līknes.
- Reakcijas uz IMD, HVIL, izolācijas, kontaktoru un sakaru notikumiem, kā arī BMS/CMS zudumu.
- Kļūmes smaguma pakāpe, apstiprināšanas aizkave (debounce), histerēze, fiksēšana (latching), atiestatīšanas atļaujas un drošā stāvokļa darbība katrai modelētajai diagnostikai.

9.3 Drošības rezervju apstrāde

Piegādātāja absolūtās robežvērtības, ieteicamās darbības robežvērtības un projektam kalibrētās BMS robežvērtības jāglabā atsevišķi. Lietotājam jāpiemēro rezerve kā absolūta nobīde, procentuāla vērtība, uzmeklēšanas tabula vai noteikumu kopa. Pārskatos jāuzrāda sākotnējā avota robežvērtība un iegūtā kalibrētā robežvērtība, lai inženiertehnisko rezervi varētu auditēt.

9.4 Karšu ģenerēšana un eksports

Modelim jāģenerē patvaļīgas izšķirtspējas SOC-temperatūras kartes, nevis fiksētas 21×13 tabulas. Lietotājam jāizvēlas atbalsta punkti un interpolācija. Kartēm jābūt eksportējamām CSV/XLSX/JSON vai līdzvērtīgā formātā un dokumentētā mašīnlasāmā formātā, kas piemērots turpmākai ieviešanai BMS piegādātāja pusē. Katrā eksportētajā kalibrēšanā jāiekļauj mērvienības, versija, avota datu kopa un rezerves konfigurācija.

10. SOC, SOE, SOH un SOP novērtēšanas modeļi

10.1 SOC

Modelim jārealizē kulonu skaitīšana ar temperatūrai/SOH korigētu ietilpību un uz OCV balstītu korekciju miera stāvoklī, kā arī paplašinātais Kalmana filtrs (EKF), unscented Kalmana filtrs (UKF) vai līdzvērtīgs novērotājs.

- Lietotāja konfigurējams sākotnējais SOC un tā nenoteiktība.
- Kulona lietderības koeficients atkarībā no uzlādes/izlādes virziena.
- Ietilpības atkarība no temperatūras un SOH.
- OCV korekcija tikai tad, ja ir izpildīti relaksācijas nosacījumi, vai ar validēta novērotāja palīdzību.
- Sensoru nobīdes/trokšņa ietekmes un dreifa analīze.
- Paralēli slēgtu virkņu SOC nesakritības apstrāde.

10.2 SOE

$$SOE = E_{\text{remaining}} / E_{\text{available, reference}}$$

SOE aprēķinā jāņem vērā faktiskais izmantojamais sprieguma/SOC logs, slodzes sprieguma ierobežojumi un no temperatūras atkarīgā ietilpība. Modelim jānošķir nominālā uzkrātā enerģija no izmantojamās atdodamās enerģijas pie pašreizējās darba slodzes un jaudas līmeņa.

10.3 SOH

Modelim jāatbalsta ietilpības SOH, pretestības SOH un kompozītais SOH kā atsevišķi rādītāji. Modelis nedrīkst piespiestu kārtā izmantot vienu SOH skalāru gan ietilpības samazināšanās, gan pretestības pieauguma atspoguļošanai. Lietotāja ievadītajām izmērītajām SOH vērtībām jābūt izmantojamām bez novecošanās modeļa.

10.4 SOP

SOP jāaprēķina izvēlamiem laika horizontiem, piemēram, momentānam, 10 s, 30 s, 60 s un ilgstošam. Ierobežojošās strāvas noteikšanā jāņem vērā slodzes sprieguma prognoze attiecīgajā horizontā, strāvas kartes, temperatūra, RC polarizācija, aparatūras un termiskie ierobežojumi.

11. Dzelzceļa izmērīto darba ciklu imports un telemetrijas atkārtota izspēle

Darba ciklu apakšsistēmai jāpieņem reāla transportlīdzekļa telemetrija un ārēji sagatavoti darba ciklu faili. Modelis nedrīkst pieprasīt konkrētu DIGAS datu registratora formātu. Datu kartēšanas slānim jāpārveido avota kolonnas kanoniskā inženiertehniskā shēmā.

11.1 Minimālie pieņemamie izmērītā darba cikla ievaddati

- Laiks/laika zīmogs.
- Transportlīdzekļa ātrums.
- GPS/maršruta pozīcija vai kilometrāža.
- Augstums vai slīpums (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, tiek pieņemts horizontāls ceļš).
- Vilces jauda, līdzstrāvas kopnes jauda vai baterijas jauda.
- Motora griezes moments/apgriezienu ātrums vai vilces spēks (var atstāt tukšu).
- Bremzēšanas komanda un/vai rekuperācijas jauda.
- Baterijas spriegums/strāva.
- Šūnu/moduļu/bloku temperatūras.
- Esošās sistēmas ziņotie SOC/SOH/SOP.
- Palīgsistēmu jauda.
- Ģenerators/kurināmā elementa/lādētāja jauda (var atstāt tukšu transportlīdzekļiem bez šiem avotiem).
- Apkārtējās vides temperatūra.

- Dzesēšanas šķidrums ieplūdes/izplūdes temperatūra, plūsma, spiediens, sūkņa/sildītāja/dzesētāja stāvokļi (var atstāt tukšu).
- Mašīnista vadības/kontrollera pozīcijas (notch)/režīma stāvoklis (var atstāt tukšu).

11.2 Datu kvalitātes apstrāde

- Konstatēt datu pārrāvumus, dublētus laika zīmogus, nepareizā secībā esošus paraugus, fiziski neiespējamās vērtības, piesātinājumu un sensorus ar nemainīgu (flat-lined) signālu.
- Nodrošināt lietotāja apstiprinātu pārrāvumu apstrādi ar interpolāciju, pēdējās vērtības saglabāšanu, dzēšanu vai tikai atzīmēšanu.
- Aprēķināt diskretizācijas intervālu statistiku un saglabāt sākotnējo datu kopu nemainītu.
- Nodrošināt ar atšķirīgu frekvenci reģistrētu kanālu sinhronizāciju.
- Nodrošināt iespēju lietotājam ievadīt laika nobīdi starp datu sistēmām.
- Nodrošināt datu kvalitātes karodziņus kanoniskajā reģistrā un eksportētajos rezultātos.

11.3 Jaudas vadīta atkārtota izspēle

Bateriju modeļa izpildei jāpietiek vismaz ar laika zīmogu un pieprasīto baterijas/līdzstrāvas kopnes jaudu. Ja ir sniegta tikai jauda pie riteņiem/vilces jauda, modelim jāpiemēro konfigurētais motora/invertora/DC/DC lietderības koeficients un palīgsistēmu slodzes modelis, lai aprēķinātu baterijai pieprasīto jaudu. Ja ir sniegta izmērītā baterijas strāva/spriegums, atkārtotajai izspēlei jāatbalsta modeļa un mērījumu salīdzinoša validācija.

12. Maršruta, vilciena un darba cikla sintēzes modelis

Maršruta sintezatoram no transportlīdzekļa un maršruta datiem jāaprēķina fizikāli caurskatāms dzelzceļa garenvirziena slodzes profils. Tam jāatbalsta gan ātri priekšizpētes līmeņa aprēķini, gan augstākas izšķirtspējas inženiertehniskās simulācijas. Lietotājam jābūt iespējai aizstāt jebkurus iekšēji ģenerētos maršruta/ātruma/slīpuma datus ar uzmērītiem vai operatora datiem.

12.1 Transportlīdzekļa/vilciena ievaddati

- Transportlīdzekļa tips un identifikators.
- Tukšmasa, kravas/pasažieru masa un vilciena bruto masa.
- Rotējošo masu koeficients vai ekvivalentā inerce.
- Saķeres masa.
- Riteņa diametrs un pārnesumskaitlis.
- Dzenošo asu skaits.
- Maksimālais vilces spēks un ātrums.
- Motora/invertora griezes momenta-ātruma/jaudas kartes.
- Ilgstošā un maksimālā vilces jauda.
- Maksimālais darba/rekuperatīvās bremzēšanas spēks.
- Palīgsistēmu jaudas profils.
- Aerodinamiskās/kustības pretestības koeficienti.
- Līkņu pretestības formulējums (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, līkņu pretestība ir nulle).
- Saķeres koeficients vai no ātruma/vides apstākļiem atkarīga karte.
- Pieļaujamā paātrinājuma/palēninājuma un rāvienu robežvērtības.
- Stāvēšanas laiks stacijās un ekspluatācijas aizkaves.

12.2 Maršruta ievaddati

- Sākuma un beigu punkti vai importēts kilometrāžas profils.
- Attālums/kilometrāža.
- Punktu augstums un/vai slīpums.
- Ātruma ierobežojumi.
- Līknes rādiuss (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, līknes pretestība ir nulle).
- Stacijas/pieturas un stāvēšanas laiki.
- Kustības virzienam specifiski ierobežojumi.

- Kustības saraksta/vilcienu ceļu plānošanas ierobežojumi (var atstāt tukšu).
- Apkārtējās vides temperatūras/laikapstākļu profils.
- Uzlādes vietas vai elektrificēti posmi.
- Infrastruktūras vai transportlīdzekļa konfigurācijas noteikti rekuperatīvās bremzēšanas ierobežojumi.

12.3 Kustības pretestība

$$F_{\text{run}}(v) = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

Jānodrošina vispārīgā Davis formula ar lietotāja definētiem koeficientiem. Koeficienti var attiekties uz visu sastāvu vai tikt veidoti no lokomotīvu un vagonu grupām. Jāatbalsta arī īpatnējās pretestības formulējums N/kN.

$$r(v_{\text{kmh}}) = a + b \cdot v_{\text{kmh}} + c \cdot v_{\text{kmh}}^2 \quad [\text{N/kN}]$$

$$F_{\text{run}} = r(v) \cdot W_{\text{kN}}$$

Modelī jāiekļauj konfigurējama priekšizpētes atskaites sakarība, un tam jāļauj lietotājiem saglabāt operatoram vai transportlīdzeklim specifiskas koeficientu kopas. Neviena atsevišķa pretestības vienādojums nedrīkst būt iekodēts kā universāli derīgs.

12.4 Slīpuma un līkņu pretestība

$$F_{\text{grade}} = m \cdot g \cdot \sin(\arctan(i/1000)) \approx m \cdot g \cdot i/1000$$

$$F_{\text{curve}} = f(R, \text{sliežu platums, transportlīdzeklis}) \quad \text{vai} \quad r_{\text{curve}}(R) \cdot W_{\text{kN}}$$

Pozitīvs slīpums atbilst kāpumam. Atpakaļvirziena simulācijā jāmaina fiziskā maršruta profila slīpuma zīme, ja vien nav sniegts neatkarīgs atpakaļvirziena profils.

12.5 Paātrinājums un dinamiskais spēks

$$m_{\text{eq}} = m \cdot (1 + \lambda_{\text{rot}})$$

$$F_{\text{acc}} = m_{\text{eq}} \cdot a$$

$$F_{\text{req}} = F_{\text{run}} + F_{\text{grade}} + F_{\text{curve}} + F_{\text{acc}}$$

$$P_{\text{wheel}} = F_{\text{req}} \cdot v$$

12.6 Saķeres ierobežojums

$$F_{\text{adh,max}} = \mu(v, \text{laikapstākļi, sliežu stāvoklis}) \cdot m_{\text{adh}} \cdot g$$

Vilce un elektriskā bremzēšana jāierobežo ar saķeri. Lietotājam jābūt iespējai izmantot skalāru koeficientu, no ātruma atkarīgu līkni, atsevišķas vilces/bremzēšanas vērtības vai vides apstākļiem specifisku karti.

12.7 Ātruma profila aprēķins

Jābūt pieejamiem trim režīmiem: izmērītā ātruma atkārtota izspēle, importēts mērķa ātruma profils un aprēķināts ātruma profils. Aprēķina režīmā tiešās/apgrieztās integrēšanas algoritmam jānodrošina līnijas ātruma, transportlīdzekļa paātrinājuma, bremzēšanas, vilces jaudas/vilces spēka ierobežojumu un apstāšanās punktu ievērošana. Telpiskajai izšķirtspējai jābūt lietotāja konfigurējamai; īsiem maršrutiem un pieejām stacijām jāatbalsta vērtības līdz 10 m vai smalkākas.

12.8 Negatīvā mehāniskā enerģija un rekuperācijas iespējas

$$E_{\text{kin}} = 0.5 \cdot m_{\text{eq}} \cdot v^2$$

Modelim jāidentificē negatīvā jauda pie riteņiem, ko rada jaudas pārpalikums lejupslīpumos un palēnināšanās. Pēc tam mehāniskās bremzēšanas potenciāls jāizvada caur saķeres, motora-generatora, invertora, līdzstrāvas kopnes, baterijas un BMS uzņemšanas ierobežojumiem. Atsevišķi jāuzrāda šādas enerģijas komponentes: teorētiskā negatīvā mehāniskā enerģija; elektriski pārveidojamā rekuperācijas enerģija; baterijas uzņemtā rekuperācijas enerģija;

baterijas ierobežojumu dēļ noraidītā enerģija; jaudas elektronikas/saķeres ierobežojumu dēļ noraidītā enerģija; reostatiskās/dinamiskās bremzēšanas izkliedētā enerģija; berzes bremžu enerģija.

12.9 Atkārtoti cikli un ekspluatācijas grafiks

Lietotājam jābūt iespējai definēt atkārtotus turp-atpakaļ braucienus, stāvēšanu galastacijās, uzlādes iespējas, maiņu/dienas grafikus un nakts stāvēšanu (overnight soak). Iegūtajam baterijas SOC un temperatūrai jātiek pārnestiem starp cikliem. Modelim jāaprēķina, vai tiek sasniegts periodisks līdzsvara stāvoklis, un jāuzrāda diennakts enerģijas balance.

13. Vilces motora, invertora, DC/DC, lādētāja un bremzēšanas modeļi

13.1 Vilces motors

- Griezes momenta-ātruma darbības apgabala ievade ar ilgstošās un maksimālās slodzes līknēm.
- Lietderības koeficienta karte $\eta_{\text{motor}}(\omega, \text{Torque}, T)$ vai skalāra rezerves vērtība.
- Lauka vājināšanas apgabals.
- Rekuperācijas griezes momenta darbības apgabals neatkarīgi no vilces režīma darbības apgabala.
- Motora termiskā jaudas ierobežošana (derating) jāievada kā ierobežojumu karte vai ārējs jaudas ierobežojums (var atstāt tukšu).
- Mehāniskais apgriezienu ātrums, kas aprēķināts no riteņa diametra un pārnēsamskaitļa.

13.2 Invertors

Invertora modelim jāpieņem lietderības koeficients kā līdzsprieguma, izejas jaudas/griezes momenta un ātruma funkcija. Ja ir ievadīta tikai skalāra lietderības koeficienta vērtība, modelim tā jāizmanto un rezultātos jānorāda šis vienkāršojums. Līdzstrāvas kopnes strāva jāaprēķina no faktiskā kopnes sprieguma, nevis no nominālā sprieguma.

$$P_{\text{DC}, \text{trac}} = P_{\text{motor}, \text{electrical}} / \eta_{\text{inv}}$$

$$P_{\text{DC}, \text{regen}} = P_{\text{motor}, \text{generator}} \cdot \eta_{\text{inv}, \text{regen}}$$

13.3 DC/DC pārveidotājs

Divvirzienu DC/DC modeļiem jāatbalsta sprieguma/strāvas ierobežojumi abos pieslēgumos, lietderības koeficienta kartes, gaidstāves patēriņš un no virziena atkarīgs lietderības koeficients. Tas ļauj simulēt vairākus bateriju blokus ar dažādiem sprieguma līmeņiem vai bateriju/kurināmā elementu hibrīdarhitektūras.

13.4 Ārējais lādētājs

- AC/DC vai DC uzlādes jaudas ierobežojums.
- Lādētāja lietderības koeficients atkarībā no jaudas.
- Elektrotīkla jaudas ierobežojums.
- Uzlādes strāvas/sprieguma vadības saskarne ar BMS ierobežojumiem.
- Uzlādes strāvas pakāpeniska samazināšana (tapering).
- Stāvēšanas laika logs uzlādes stacijā.
- Termiskās pārvaldības palīgsistēmu enerģija uzlādes laikā.

13.5 Bremzēšanas veidu kombinēšana

Modelim jāsadala pieprasītā bremzēšana starp rekuperatīvo elektrisko bremzēšanu, reostatisko/dinamisko bremzēšanu un berzes bremzēšanu. Sadalījums jāpārrēķina dinamiski, mainoties baterijas uzņemtspejai, kopnes spriegumam, motora apgriezienu ātrumam, saķerei un BMS ierobežojumiem.

14. Hibrīdā avota, ģeneratora un uzlādes stratēģijas attēlojums

Hibrīdajiem dzelzceļa transportlīdzekļiem bateriju nav iespējams pareizi dimensionēt, neattēlojot citus enerģijas avotus. Tādēļ modelī jāiekļauj konfigurējami avotu modeļi dzinēja-ģeneratora agregātiem, kurināmā elementiem, uzlādei no kontakttīkla/stacionāra pieslēguma vai citiem līdzstrāvas avotiem. Detalizēta sadegšanas/kurināmā elementu elektroķīmijas modelēšana nav nepieciešama, ja vien attiecīgie modeļi netiek iesniegti atsevišķi; tomēr jāmodelē jaudas/lietderības koeficienta un darbības stāvokļu uzvedība.

14.1 Ģenerators/darbības rādīša paplašinātājs

- Ģeneratora minimālā/maksimālā jauda.
- Mērķa augsta lietderības koeficienta darbības diapazons.
- Jaudas izmaiņas ātrums un iedarbināšanas/apturēšanas aizkave.
- Degvielas vai avota lietderības koeficienta karte atkarībā no jaudas.
- Iesildīšanas un minimālā darbības laika ierobežojumi (var iestatīt uz nulli).
- EMS mērķa SOC diapazons.
- Baterijas atbalsts maksimālā pieprasījuma laikā.
- Baterijas uzlāde zema pieprasījuma/stāvēšanas laikā.

14.2 EMS jaudas sadales stratēģijas

Lietotājam jābūt iespējai izvēlēties vai ar skriptu definēt vismaz šādas stratēģijas: uzlādes patērēšanas (charge-depleting), uzlādes uzturēšanas (charge-sustaining), fiksēta SOC diapazona, maršrutu ievērojoša SOC mērķa, maksimumslodzes samazināšanas (peak-shaving), ģeneratora konstantas jaudas, tikai baterijas darbības ģeogrāfiski norobežotā posmā un ārēji uzlādējama darba režīma stratēģiju. Jaudas sadales loģikai vienmēr jāievēro bateriju modeļa atgrieztie momentānie BMS/SOP ierobežojumi.

15. Baterijas izmēru noteikšana un transportlīdzekļa/maršruta parametrizācija

Izmēru noteikšanas modulim jānosaka, vai piedāvātā topoloģija var izpildīt maršruta un transportlīdzekļa prasības, un jāveic veselo skaitļu topoloģijas/projektēšanas telpas pārmeklēšana (§15.2). Izmēru noteikšanā vienlaikus jāņem vērā enerģija, jauda, spriegums, rekuperācijas uzņemspēja, termiskā uzvedība, masa, tilpums un strāvu vadošā aparatūra.

15.1 Lietotāja definēti projektēšanas ierobežojumi

- Līdzstrāvas kopnes minimālais/nominālais/maksimālais spriegums.
- Maksimālais un mērķa bloka spriegums.
- Nepieciešamais attālums vai darbības laiks, izmantojot tikai bateriju.
- Nepieciešamā ilgstošā vilces jauda.
- Nepieciešamā maksimālā jauda un tās ilgums.
- Nepieciešamā rekuperatīvās bremzēšanas jauda un tās ilgums.
- Minimālā SOC rezerve maršruta beigās.
- Pieļaujamais SOC darbības logs.
- Maksimālās šūnu, moduļu un dzesēšanas šķidruma temperatūras.
- Minimālā temperatūra neierobežotai uzlādei/izlādei.
- Pieejamie bloku izvietojanas gabarīti.
- Maksimālā baterijas masa un ass slodzes ierobežojumi.
- Bloku izvietojanas gabarītu skaits un atrašanās vieta.
- Maksimālā kabeļu/strāvas nominālā vērtība.
- Uzlādes jauda un laika logs.
- Mērķa kalpošanas laiks vai ekvivalento pilno ciklu skaits, ja ir iespējota novecošanās modelēšana.

15.2 Veselo skaitļu topoloģijas pārmeklēšana

Modelim jāspēj uzskaitīt vai optimizēt diskrētas kombinācijas no virknē/paralēli slēgto šūnu skaita, virknē/paralēli slēgto moduļu skaita un bloku zaru skaita. Kandidātrisinājumi, kas pārkāpj sprieguma, kanālu skaita, strāvas, jaudas, enerģijas vai lietotāja definētos fiziskos ierobežojumus, jānoraida, dokumentējot noraidīšanas iemeslu.

15.3 Prasītie izmēru noteikšanas rezultāti

- Kopējais šūnu/moduļu/bloku skaits.
- Nominālais un minimālais/maksimālais spriegums.
- Bruto un izmantojamā enerģija.
- Ilgstošā un īslaicīgā uzlādes/izlādes jaudas spēja atkarībā no SOC/temperatūras.
- Paredzamā maksimālā vilces un rekuperācijas strāva.
- Masa un tilpums, kas aprēķināti no lietotāja sniegtās komponentu ģeometrijas/masas.
- Paredzamais SOC profils maršrutā un SOC maršruta beigās.
- Temperatūras maksimums un laiks līdz termiskā ierobežojuma iestāšanās brīdim.
- Dzesēšanas/sildīšanas nepieciešamība.
- Uzņemta/noraidīta rekuperācijas enerģija.
- Jaudas rezerves un enerģijas rezerves robežas.
- Slēdziens par maršruta izpildāmību, kas balstīts uz skaidri definētiem ierobežojumiem, nevis kvalitatīvu vērtējumu.

16. Nestacionārais termiskais modelis un siltuma izdalīšanās aprēķins

Termiskajam modelim jābūt reālam nestacionāram siltuma bilances modelim, kas sasaistīts ar elektrisko uzvedību. Uzmeklēšanas tabula, kas piešķir temperatūru tikai atkarībā no C-rate, nav pietiekama. Modelim jāattēlo šūnu termiskā masa, iekšējā siltuma izdalīšanās, siltumvadīšana uz blakus esošajām konstrukcijām, siltuma pārnese uz dzesēšanas plātni vai gaisu, dzesēšanas šķidruma transports, siltuma pārnese caur korpusu/izolāciju un apkārtējās vides apstākļi.

16.1 Šūnas siltuma izdalīšanās

$$Q_{\text{dot_irr}} = I \cdot (OCV - V_t) \approx I^2 R_0 + I \cdot (V_1 + V_2)$$

$$Q_{\text{dot_rev}} = -I \cdot T \cdot (\partial OCV / \partial T)_{SOC}$$

$$Q_{\text{dot_cell}} = Q_{\text{dot_irr}} + Q_{\text{dot_rev}} + Q_{\text{dot_additional}}$$

Atgriezeniskais entropijas siltums jāaprēķina no ievadītajiem $dOCV/dT$ datiem; ja šis lauks ir tukšs, tas ir nulle, un rezultātos tas tiek norādīts. Modelī jāiekļauj arī balansēšanas rezistoru, kopņu stieņu, kontaktooru un lokālās elektronikas siltums; katru no tiem var iestatīt uz nulli.

16.2 Termiskā tīkla vienādojums

$$C_i \cdot dT_i/dt = Q_{\text{dot_i}} + \sum_j G_{ij} \cdot (T_j - T_i) + Q_{\text{dot_conv,i}} + Q_{\text{dot_rad,i}}$$

Siltumietilpība C_i un siltumvadītspēja G_{ij} jāparametrizē, izmantojot materiālu īpašības, ģeometriju, kontakta pretestību un kalibrētas efektīvās vērtības. Termiskajā tīklā katrai termiski reprezentatīvai šūnu grupai jāparedz vismaz viens šūnas kodola mezgls un viens virsmas/dzesēšanas plātnes saskarnes mezgls. Lietotājam jābūt iespējai palielināt modeļa detalizācijas pakāpi.

16.3 Telpiskais temperatūras sadalījums

- Aprēķināt šūnu temperatūras minimālo, maksimālo un vidējo vērtību un standartnovirzi.
- Aprēķināt temperatūras izkliedi katrā modulī un blokā.
- Identificēt karstāko šūnu/grupu un šī stāvokļa iestāšanās laiku.
- Nodrošināt, ka dažādām šūnām/moduļiem var būt atšķirīgi dzesēšanas šķidruma vai apkārtējās vides robežnosacījumi.

- Nodrošināt termiskās asimetrijas modelēšanu, ko rada kolektora novietojums, korpusa malas, elektronikas/BJB siltums, blakus esošās iekārtas vai daļējs dzesēšanas šķidruma plūsmas nosprostojums.
- Nodrošināt mezglu līmeņa laika vēsturi izvēlētajām šūnām/moduļiem.

16.4 Termiskā materiālu slāņu struktūra

Lietotājam jādefinē termiskie ceļi: šūna-TIM, TIM, dzesēšanas plātne, konstrukcijas plātne, termiskā barjera/izolācija, korpuss un apkārtējā vide. Materiālu parametros jāiekļauj biezums, laukums, siltumvadītspēja, siltumietilpība, blīvums un kontakta pretestība (kontakta pretestību var iestatīt uz nulli). Modelim jāatbalsta alternatīvas iekšējās izolācijas koncepcijas un jākvantificē to ietekme uz iesilšanu, atdzišanu, karstā punkta temperatūru un enerģijas patēriņu.

17. Dzesēšanas plātnes, dzesēšanas šķidruma kontūra un hidrauliskais modelis

17.1 Dzesēšanas šķidruma enerģijas bilance

$$\dot{Q}_{\text{coolant}} = \dot{m} \cdot c_p(T, x) \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

$$dT_{\text{coolant}}/dx = q_{\text{prime}}(x) / (\dot{m} \cdot c_p)$$

Dzesēšanas šķidruma īpašībām jābūt atkarīgām no temperatūras (no temperatūras atkarīgos datus var atstāt tukšus; ja tie nav ievadīti, tiek izmantotas nemainīgas īpašības). Lietotājam jādefinē ūdens/glikola attiecība vai cits dzesēšanas šķidrums un tā blīvums, siltumietilpība, viskozitāte, siltumvadītspēja un sasalšanas temperatūra.

17.2 Dzesēšanas plātnes siltuma pārnese

Dzesēšanas plātnes modelim jāattēlo termiskā pretestība no šūnas virsmas caur TIM līdz plātnei un konvektīvā pretestība no plātnes sienas līdz dzesēšanas šķidrumam. Lietotājam jāievada vai jāimportē efektīvais siltuma pārnese koeficients no CFD/testu datiem vai jādefinē kanālu ģeometrija, lai modelis aprēķinātu uz korelāciju balstītu koeficientu.

$$R_{\text{th, total}} = R_{\text{cell-contact}} + t_{\text{TIM}} / (k_{\text{TIM}} \cdot A) + R_{\text{plate}} + 1 / (h_{\text{coolant}} \cdot A_{\text{wet}})$$

17.3 Hidrauliskais spiediena kritums

$$\Delta p_{\text{fric}} = f \cdot (L/D_h) \cdot \rho v^2 / 2$$

$$\Delta p_{\text{minor}} = K \cdot \rho v^2 / 2$$

$$\Delta p_{\text{branch}} = \Sigma \Delta p_{\text{fric}} + \Sigma \Delta p_{\text{minor}}$$

Modelim jāaprēķina Reinoldsa skaitlis, berzes koeficients un zara spiediena kritums. Laminārai plūsmai jāizmanto kanāla šķērsgriezumam atbilstoša, izpildītāja dokumentēta laminārās plūsmas berzes sakarība (apaļiem kanāliem $f = 64/Re$). Turbulentai plūsmai jāizmanto Colebrook, Swamee-Jain vai līdzvērtīga validēta korelācija. Jāatbalsta lietotāja ievadītas empīriskas spiediena krituma līknes.

17.4 Plūsmas sadalījums paralēlos zaros

Paralēliem moduļu/dzesēšanas plātņu zariem plūsma jāsadala, risinot vienāda spiediena krituma nosacījumu, nevis pieņemot vienmērīgu sadalījumu, ja vien zari nav identiski. Modelim jāaprēķina kolektora un zaru zudumi vai jāļauj izmantot kalibrētus zaru plūsmas koeficientus.

17.5 Sūkņa darba punkts

Lietotājam jāsniedz sūkņa spiediena-plūsmas līkne un elektriskās jaudas/lietderības koeficienta līkne vai fiksēts plūsmas/spiediena avots. Faktiskais darba punkts jānosaka sūkņa un sistēmas līkņu krustpunktā. Sūkņa apgriezienu regulēšanas mērķis var būt plūsma, spiediens, dzesēšanas šķidruma delta-T, šūnas temperatūra vai BMS pieprasījums.

$$P_{\text{pump,electrical}} = \Delta p \cdot \dot{V} / \eta_{\text{pump}}$$

17.6 Minimālās plūsmas un dzesēšanas zuduma gadījumi

Modelim jānosaka minimālā dzesēšanas šķidruma plūsma, kas nepieciešama, lai visu modelēto šūnu temperatūra darba cikla laikā nepārsniegtu izvēlēto temperatūras robežvērtību. Tam jāsimulē samazinātas plūsmas un nulles plūsmas kļūmes, jākvantificē laiks līdz jaudas ierobežošanai (derating)/atslēgšanai un jānosaka, vai šūnu temperatūra paliek zem atslēgšanas robežvērtības, līdz tiek pabeigta kontrolēta apturēšana.

18. Sildīšanas, dzesēšanas, siltumizolācijas un vides robežnosacījumu modeļi

18.1 Ilgstoša atrašanās aukstumā (cold soak) un baterijas temperatūras priekšsagatavošana

Lietotājam jāiestata sākotnējā šūnu/moduļu/dzesēšanas šķidruma/korpusa temperatūra vai jāizpilda iepriekšējas termiskās izlīdzināšanās (soak) simulācija. Modelim jāaprēķina sildītāja enerģija un laiks, kas nepieciešams, lai sasniegtu lietotāja definētās atļaušanas temperatūras izlādei, uzlādei un rekuperatīvajai bremzēšanai. Pieejamā jauda jāatļauj pakāpeniski saskaņā ar BMS kartēm, šūnām sasilstot.

$$E_{\text{heat,ideal}} = \sum m_i c_{p,i} (T_{\text{target}} - T_{\text{initial}})$$

Faktiskajā elektriskās sildīšanas enerģijā papildus jāiekļauj siltuma zudumi apkārtējā vidē, dzesēšanas šķidruma kontūrā, korpusā un citās masās. Sildītāja efektivitātei un vadības stratēģijai jābūt lietotāja definētām.

18.2 Sildītāja modelis

- Elektriskā sildītāja jaudas ierobežojums.
- Sildītāja jaudas atkarība no sprieguma (var atstāt tukšu; ja lauks ir tukšs, sildītāja jauda ir nemainīga).
- Efektivitāte.
- Vadības histerēze/PID vai ieslēgšanas-izslēgšanas (on-off) loģika.
- Sildītāja izvietojums: dzesēšanas šķidruma kontūrs, plātne, gaiss vai tiešās sildīšanas elements.
- Jauda, kas tiek ņemta no baterijas, ārējā barošanas avota vai cita avota.
- Maksimālā dzesēšanas šķidruma vai komponenta temperatūra.

18.3 Dzesētājs / radiators / siltummainis

Termiskās pārvaldības sistēmas iekārtām jāatbalsta radiators/siltummainis ar apkārtējo vidi un/vai saldēšanas dzesētājs. Dzesētāja ieejas jauda jāmodelē, izmantojot COP karti atkarībā no siltuma slodzes un temperatūras pacēluma.

$$\text{COP} = \dot{Q}_{\text{removed}} / P_{\text{chiller}}$$

Modelim jāaprēķina dzesētāja, sūkņa, ventilatora un sildītāja palīgsistēmu enerģijas patēriņš brauciena/dienas laikā. Tam jānošķir vilces enerģija no BTMS palīgsistēmu enerģijas.

18.4 Siltuma pārnese ar apkārtējo vidi un korpusu

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_{\text{ext}} \cdot A \cdot (T_{\text{ambient}} - T_{\text{surface}})$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A [(T_{\text{surroundings}} + 273.15)^4 - (T_{\text{surface}} + 273.15)^4]$$

Lietotājam jābūt iespējai definēt konvekcijas koeficientus vai korelācijas stāvēšanas režīmam, zemgrīdas izvietojumam un izvietojumam uz jumta. Modelim jāatbalsta saules starojuma slodze kā robežnosacījums jumta/korpusa pētījumiem (var iestatīt uz nulli).

18.5 Vides scenāriji

- Auksta apkārtējā vide/ilgstoša atrašanās aukstumā bez uzlādes, līdz tiek sasniegti temperatūras kritēriji.

- Karsta apkārtējā vide/augsta saules starojuma slodze.
- Augsta ilgstoša vilces jauda.
- Atkārtoti paātrināšanās/rekuperācijas cikli.
- Uzlāde depo karstos vai aukstos apstākļos.
- Dzesēšanas sistēmas daļēja aizsprostošanās.
- Sūkņa atteice.
- Dzesētāja atteice.
- Sildītāja atteice.
- Temperatūras sensora nobīde, kas izraisa aizkavētu vadības reakciju.

19. Saistītais elektrotermiskais risinātājs un skaitliskās prasības

Elektriskie un termiskie modeļi jārisina iteratīvi vienā laika apgabala ciklā. Šūnas pretestība/strāvas spēja ir atkarīga no temperatūras, savukārt temperatūra ir atkarīga no elektriskajiem zudumiem. Tādēļ modelim katrā sasaistes solī jāatjaunina šūnu/bloka elektriskie parametri atbilstoši pašreizējam temperatūras stāvoklim un jāatjaunina termiskā siltuma izdalīšanās atbilstoši aprēķinātajai elektriskajai strāvai un spriegumam.

19.1 Aprēķinu secība katrā laika solī

1. Nolasīt maršruta/telemetrijas jaudas pieprasījumu un transportlīdzekļa pašreizējo režīmu.
2. Atjaunināt vides, dzesēšanas šķidruma un komponentu robežnosacījumus.
3. Atjaunināt šūnu parametru kartes atbilstoši SOC, temperatūrai, SOH un strāvas virzienam.
4. Aprēķināt BMS uzlādes/izlādes/rekuperācijas strāvas un jaudas ierobežojumus.
5. Aprēķināt jaudas elektronikas un transportlīdzekļa ierobežojumus.
6. Atrisināt baterijas strāvu(-as), kopējās līdzstrāvas kopnes spriegumu un strāvas sadalījumu starp zariem.
7. Atjaunināt elektriskā ECM stāvokļus, SOC/SOE un komponentu zudumus.
8. Aprēķināt šūnu un komponentu siltuma izdalīšanos.
9. Atrisināt dzesēšanas šķidruma plūsmu/spiedienu un termiskā tīkla stāvokli.
10. Piemērot aizsardzības taimerus, jaudas ierobežošanu (derating), kontaktoru vai režīmu notikumus.
11. Ierakstīt kanoniskos rezultātu kanālus un pāriet uz nākamo soli.

19.2 Nezūdamības pārbaudes

- Elektriskais KCL atlikums paralēlajiem zariem.
- Elektriskās enerģijas bilances atlikums.
- Siltumenerģijas bilances atlikums.
- Dzesēšanas šķidruma entalpijas bilances atlikums.
- SOC/kulonu skaitīšanas bilance.
- Mehāniskās enerģijas pārveides elektriskajā enerģijā bilance caur motoru/invertoru (tiek aprēķināta, ja ir ievadīti motora/invertora dati; pretējā gadījumā rezultātos norāda, ka tā nav aprēķināta).

Modelim jāuzrāda atlikumi un konfigurējamās pielaižu. Simulācija, kas pārsniedz pielaidi, jāatzīmē, nevis klusējot jāpieņem.

20. Kļūmju, degradētā režīma un drošā stāvokļa simulācija

Kļūmju simulācijai jābūt integrētai ar to pašu BMS/termisko/elektrisko loģiku, ko izmanto normālā darbībā. Modelim jāatbalsta ieplānotas kļūmes noteiktā laikā/maršruta vietā un nosacījumu izraisītas kļūmes.

20.1 Elektriskās un BMS kļūmes

- Šūnas ietilpības samazināšanās.
- Šūnas pretestības palielināšanās.
- Šūnu SOC nelīdzsvarotība.

- Pārtraukts sprieguma mērīšanas vads.
- Temperatūras sensora īssavienojums vai nobīde.
- Strāvas sensora nobīde un mēroga kļūda.
- Bloka sprieguma sensora nobīde.
- CMU sakaru zudums.
- Bloka galvenās vadības ierīces (pack master) sakaru zudums.
- Kontaktora atteice atvērtā stāvoklī.
- Kontakts sametināts saslēgtā stāvoklī.
- Priekšuzlādes kontaktora/rezistora kļūme.
- Drošinātāja nostrāde/pārtraukts zars.
- Izolācijas/HVIL kļūmes ievades signāls.
- Moduļa izolēšanas/apiešanas (bypass) notikums konfigurācijām ar moduļu izolēšanas vai apvada ierīcēm (§3.2).
- Jebkurš bloku zaru skaits nav pieejams (no 1 līdz visiem, izņemot vienu).

20.2 Termiskās kļūmes

- Sūkņis apstājies.
- Samazināts sūkņa ātrums.
- Daļējs plūsmas sašaurinājums zarā.
- Viens zars pilnībā nosprostots.
- Dzesēšanas šķidruma noplūde, kas attēlota kā plūsmas/spiediena samazināšanās.
- Dzesētājs nav pieejams.
- Radiatora/ventilatora degradēta darbība.
- Sildītājs nav pieejams.
- Nepareizs termostata/vadības sliekšnis.
- Termiskās saskarnes degradācija, kas attēlota kā palielināta kontakta pretestība.

20.3 Prasītie drošā stāvokļa izvaddati

Katrai kļūmei modelim jāuzrāda konstatēšanas laiks, brīdinājuma laiks, jaudas ierobežošanas sākums, atslēgšanas/izolēšanas laiks, maksimālās šūnu/moduļu temperatūras, maksimālais/minimālais šūnu spriegums, atlikušā pieejamā jauda, ietekme uz maršrutu un drošā stāvokļa darbība. Lietotājam jābūt iespējai noteikt, vai transportlīdzeklis var turpināt kustību ar samazinātu jaudu, veikt ierobežotu posmu vai ir nepieciešama tūlītēja bloka/vilces sistēmas izolēšana.

21. Novecošana, degradācija un kalpošanas laika enerģijas novērtējums

Pilns elektroķīmiskās novecošanas modelis nav nepieciešams. Modelim jāatbalsta lietotāja definēti degradācijas likumi, lai varētu novērtēt darba cikla ietekmi. Novecošanas aprēķinam jābūt lietotāja iestatījumam (pēc noklusējuma – izslēgts); ja A pielikuma novecošanas lauki ir tukši, aprēķins tiek izslēgts, un rezultātos tas tiek norādīts.

21.1 Cikliskā novecošana

Lietotājam jābūt iespējai definēt ietilpības samazināšanās un pretestības pieauguma funkcijas atkarībā no ekvivalento pilno ciklu skaita, DOD, vidējā SOC, temperatūras un C-rate. Sarežģītiem dzelzceļa darba režīmiem jāizmanto Rainflow ciklu skaitīšana vai līdzvērtīga ciklu segmentēšanas metode.

21.2 Kalendārā novecošana

Kalendārā novecošana jāattēlo kā glabāšanas laika, temperatūras un SOC funkcija. Modelim jāpieļauj neatkarīga ietilpības un pretestības izmaiņu modelēšana.

21.3 Kalpošanas laika izvaddati

- Ekvivalento pilno ciklu skaits dienā/gadā.

- Kopējā caurplūdušī enerģija (energy throughput).
- Laiks pie augsta SOC.
- Laiks augstā/zemā temperatūrā.
- Laiks virs izvēlētajiem C-rate sliekšņiem.
- Prognozētais ietilpības SOH un pretestības SOH atkarībā no laika atbilstoši izvēlētajam degradācijas modelim.
- Prognozētais datums/ciklu skaits līdz lietotāja definētajam kalpošanas laika beigu kritērijam.
- Jutīgums pret samazinātu SOC logu vai samazinātas maksimālās jaudas stratēģiju.

22. Jutīguma, nenoteiktības un Montekarlo analīze

Modelim jānodrošina nenoteiktības analīze, jo piegādātāja parametri, maršruta slīpumi, transportlīdzekļa masa, pretestība un termiskā kontakta vērtības nav precīzi zināmas. Jābūt pieejamiem deterministiskā jutīguma un varbūtiskās Montekarlo analīzes režīmiem.

22.1 Minimālie nenoteiktie parametri

- Šūnas ietilpība.
- Šūnas R0 un dinamiskie RC parametri.
- Sākotnējais SOC.
- Parametru izkliede starp šūnām.
- Apkārtējās vides temperatūra.
- Transportlīdzekļa/vilciena masa.
- Kustības pretestības koeficienti.
- Motora/invertora efektivitāte.
- Rekuperatīvās bremzēšanas efektivitāte.
- Dzesēšanas šķidruma plūsma un sūkņa veiktspēja.
- TIM/kontakta termiskā pretestība.
- Siltuma pārneses koeficients.
- Palīgsistēmu slodze.
- Maršruta slīpuma/ātruma profila nenoteiktība.
- Sensoru nobīde.

22.2 Statistiskie izvaddati

- Vidējā vērtība, standartnovirze un procentiļu joslas maršruta enerģijai, beigu SOC, maksimālajai temperatūrai un jaudas spējai.
- Gadījumu varbūtība/ipatsvars, kuros tiek sasniegta robežvērtība.
- Jutīguma ranžējums, izmantojot standartizēto regresiju, dispersijas dekompozīciju vai citu dokumentētu metodi.
- Izklīdes/korelācijas diagrammas.
- Reproducējama gadījumskaitļu generatora sākumvērtība (seed).
- Katra atsevišķā simulācijas palaidiena vai konfigurējamās palaidienu apakškopas eksports.

23. Optimizācija un projektēšanas telpas izpēte

Modelim jānodrošina daudzu kandidātkonfigurāciju salīdzināšana, izmantojot vienotus ierobežojumus. Optimizācija var būt pilnas pārlases, heuristiska vai matemātiska, taču visām pieņemtajām kandidātkonfigurācijām un noraidīšanas iemesliem jāpaliek auditējamiem.

23.1 Iespējamās mērķfunkcijas

- Minimizēt kopējo uzstādīto šūnu skaitu.
- Minimizēt baterijas masu.
- Minimizēt bloka tilpumu.
- Minimizēt šūnas maksimālo temperatūru.
- Minimizēt BTMS enerģijas patēriņu.
- Minimizēt strāvas slodzi / RMS strāvu.

- Maksimizēt rekuperācijas enerģijas uzņemšanu.
- Maksimizēt izmantojamās maršruta enerģijas rezervi.
- Maksimizēt maršruta veikšanu degradētā režīmā ar samazinātu pieejamo bloku skaitu.
- Minimizēt prognozēto degradāciju dzīves cikla laikā.
- Daudzmērķu Pareto optimizācija.

23.2 Projektēšanas mainīgie

- Šūnas izvēle.
- Virknē/paralēli slēgto šūnu skaits.
- Moduļu grupēšana.
- Bloku zaru skaits.
- SOC darbības logs.
- Ģeneratora/EMS jaudas mērķvērtība.
- Dzesēšanas plūsmas/sūkņa vadība.
- Dzesēšanas šķidruma ieplūdes temperatūras mērķvērtība.
- Sildītāja/dzesētāja vadības sliekšņi.
- Siltumizolācijas biezums/termiskā pretestība.
- Rekuperatīvās bremzēšanas stratēģija.
- Uzlādes jaudas ierobežojums.

24. Lietotāja saskarne un inženiertehniskā darba plūsma

Lietotāja saskarnei jābūt piemērotai bateriju, termisko sistēmu un transportlīdzekļu inženieru inženiertehniskajam darbam. Parasto parametru izmaiņu veikšanai nedrīkst būt nepieciešama pirmkoda rediģēšana. Katrai lietotāja saskarnes vērtībai jāatbilst dokumentētai parametra atslēgai, un tai jābūt eksportējamai.

24.1 Prasītās darbvietas

Darbvietā	Minimālās funkcijas
Šūnu bibliotēka	Šūnu datu kopu importēšana/izveide, OCV/DCIR/strāvas karšu vizualizācija, ECM parametru aproksimēšana, datu diapazonu validācija.
Topoloģijas veidotājs	Moduļu, apakšbloku, bloku, paralēlo zaru un HV komponentu grafiska vai strukturēta definēšana.
BMS/CMS kalibrēšana	Aizsardzības sliekšņi, strāvas/jaudas kartes, balansēšana, jaudas ierobežošana (derating), diagnostika un kalibrēšanas datu eksports.
Transportlīdzekļu bibliotēka	Masa, pretestība, riteņi/pārnesums, vilces motors/invertors, bremzēšana, palīgsistēmu slodzes, hibrīdais avots.
Maršruta redaktors	Kilometrāža (chainage), augstums/slīpums, ātruma ierobežojumi, pieturas, stāvēšanas laiks, vides profils un uzlādes punkti.
Telemetrijas imports	Kolonnu piesaiste, mērvienības, zīmju konvencija, datu kvalitātes pārskatīšana, pārdiskretizācija un validācija.
Termiskā modeļa veidotājs	Termiskie mezgli, dzesēšanas plātne, TIM, siltumizolācija, dzesēšanas šķidrums, sūknis, sildītājs/dzesētājs un robežnosacījumi.
Scenāriju pārvaldnieks	Sākotnējais SOC/T, maršruts/darba režīms, kļūmes, vide, atkārtoti cikli un risinātāja iestatījumi.
Rezultātu panelis	Laikrindas, kartes, enerģijas bilance, ierobežojumu iemesli, termiskie/hidrauliskie rezultāti un salīdzinājumi.
Pakešapstrāde/optimizācija	Scenāriju parametru pārlase (sweeps), projektēšanas telpas meklēšana, Montekarlo analīze un eksports.

24.2 Lietojamības prasības

- Visiem ievaddatiem jāattēlo mērvienības un pieļaujamais diapazons.

- Rīka padomos vai palīdzības tekstā jādefinē inženiertehniskā nozīme.
- Nederīgas/nepilnīgas konfigurācijas jāidentificē pirms simulācijas sākuma.
- Lietotājam jābūt iespējai dublēt šūnu/topoloģiju/transportlīdzekli/maršrutu/scenāriju kā jaunu redakciju.
- Salīdzinājumos jā saglabā kopīgas asis un mērvienības.
- Simulācijas palaidiens nedrīkst pārrakstīt citu palaidienu, ja vien tas nav nepārprotami apstiprināts.
- Ilgiem aprēķiniem jāattēlo izpildes progress un jāļauj tos atcelt, nebojājot projekta datus.
- Visām diagrammām jānodrošina pamatā esošo datu eksports CSV vai līdzvērtīgā formātā.

25. Ievaddatu/izvaddatu shēmas un sadarbība

25.1 Prasītie importa formāti

- CSV vai līdzvērtīgs formāts
- XLSX vai līdzvērtīgs izklājlapu formāts
- JSON vai līdzvērtīgs strukturēts formāts
- Maršruta profils CSV/XLSX vai līdzvērtīgā formātā

25.2 Modeļu izpilde

Katrai simulācijai jābūt izpildāmai no scenārija faila bez manuālas iejaukšanās un bez grafiskās lietotāja saskarnes, un tai jāatgriež izpildes statuss un mašīnlasāmi rezultātu faili. Izpildes veids (skripts, komandrinda vai līdzvērtīgs) jādokumentē.

25.3 Scenārija datne

Scenārija datnē jānorāda visas izmantoto datu kopu versijas un visi lietotāja ievaddati, kas nepieciešami palaidiena reproducēšanai. Jāizmanto relatīvie projekta ceļi vai unikāli datu kopu identifikatori, lai projektu varētu arhivēt un aprēķinu izpildīt atkārtoti.

25.4 Rezultātu kanāli

Rezultātu eksportam jānodrošina pilnas laikrindas izvade simulācijas izšķirtspējā un kompakts kopsavilkums. Lietotājam jāizvēlas, kuri šūnu/moduļu kanāli tiek saglabāti, lai pārvaldītu datnes izmēru.

26. Modeļu rezultāti un inženiertehniskie eksporta dati

26.1 Elektriskie rezultāti

- Šūnu/moduļu/bloku sprieguma ekstrēmi un izvēlētās līknes.
- Zaru un bloku strāvas.
- Līdzstrāvas kopnes spriegums/strāva/jauda.
- SOC/SOE/SOH/SOP.
- Uzlādes/izlādes/rekuperācijas ierobežojums un faktiskais darba punkts.
- Ierobežojuma iemesls katrā laika paraugā.
- Omiskie/polarizācijas/sadales zudumi.
- Drošinātāju/kontaktoru/kabeļu strāva un zudumi.
- Priekšuzlādes līknes.
- Strāvas sadalījums starp paralēlajiem zariem un cirkulācijas strāva.

26.2 Termiskie/hidrauliskie rezultāti

- Šūnu/moduļu/bloku minimālā/maksimālā/vidējā temperatūra.
- Temperatūras izkliede.
- Dzesēšanas plātnes un dzesēšanas šķidruma ieplūdes/izplūdes temperatūras.
- Dzesēšanas šķidruma plūsmas zaros.

- Spiediena kritums un sūkņa darba punkts.
- Sūkņa/sildītāja/dzesētāja jauda.
- Novadītais un uzkrātais siltums.
- Laiks līdz izlādes/uzlādes/rekuperācijas pieejamībai pēc ilgstošas atrašanās aukstumā (cold soak).
- Laiks līdz jaudas ierobežošanai/atslēgšanai pēc dzesēšanas kļūmes.
- BTMS palīgsistēmu enerģijas patēriņš dienā.

26.3 Maršruta/transportlīdzekļa rezultāti

- Jauda un spēks pie riteniem.
- Jauda baterijas spailēs/līdzstrāvas kopnē.
- Bruto vilces enerģija.
- Palīgsistēmu enerģija.
- Teorētiskā negatīvā mehāniskā enerģija.
- Pārveidotā rekuperācijas enerģija.
- Baterijas uzņemtā rekuperācijas enerģija.
- Neuzņemtā/reostatiskās bremzēšanas/berzes bremžu enerģija.
- Brauciena un turp-atpakaļ brauciena neto enerģija.
- Īpatnējā enerģija uz vilcienkilometru un tonnkilometru.
- Maksimālais vilces un bremzēšanas pieprasījums.
- Maršruta posms, kas izraisa katru ierobežojošo stāvokli.

26.4 BMS/CMS inženiertehniskie izvaddati

Modelim jāģenerē strukturēta kalibrēšanas datu pakete, kurā ietverti visi izvēlētie sliekšņi, kartes, rezerves, mērvienības, atsauces uz avotiem, atbalsta punktu asis un versijas informācija. Tam jāģenerē arī inženiertehniskais ziņojums, kurā paskaidrots, kurš šūnas/aparatūras/termiskais ierobežojums nosaka katru būtisko robežvērtību.

27. Verifikācija, validācija un modeļa ticamība

Izpildītājam jāiesniedz pierādījumi, ka katrs apakšmodelis atveido vai nu analītisku risinājumu, vai kontrolētu atsauces datu kopu, vai dokumentētu sagaidāmo uzvedību. Validācija nedrīkst aprobežoties tikai ar vizuāli ticamu diagrammu uzrādīšanu.

27.1 Verifikācijas hierarhija

1. Formulu un komponentu modeļu vienību verifikācija, salīdzinot ar analītiskiem aprēķiniem.
2. Apakšmodeļu verifikācija, izmantojot sintētiskus deterministiskus testa gadījumus.
3. Parametru identifikācijas verifikācija, salīdzinot ar iesniegtajiem šūnu testu datiem.
4. Integrēta elektriskā/termiskā verifikācija kontrolētam darba ciklam.
5. Maršruta modeļa verifikācija, salīdzinot ar iesniegto maršruta reģistru vai neatkarīgu manuālu aprēķinu.
6. Validācija ar atkārtotu izspēli, salīdzinot ar Pasūtītāja iesniegto izmērīto baterijas/transportlīdzekļa telemetriju.
7. Regresijas testa gadījumi, lai pieņemtie skaitliskie rezultāti saglabātos stabili turpmāku modeļu pirmkoda failu izmaiņu gadījumā.

27.2 Prasītie kļūdu rādītāji

- Sprieguma RMSE un maksimālā kļūda.
- Temperatūras RMSE un maksimālā kļūda (aprēķina, ja Pasūtītājs iesniedz izmērītos temperatūras datus).
- SOC kļūda cikla beigās.
- Enerģijas bilances atlikums.
- Strāvas sadalījuma KCL atlikums.
- Spiediena krituma/plūsmas kļūda salīdzinājumā ar analītisko vai testa gadījumu.

- Maršruta enerģijas starpība salīdzinājumā ar atsauces reģistru.
- Parametru aproksimācijas pielāgojuma kvalitātes rādītāji (goodness-of-fit) un atlikumu diagrammas.

28. Pieņemšanas testu kopums

Pieņemšana jāveic, izmantojot Pasūtītāja iesniegtas datu kopas un turpmāk definētus sintētiskus testus. Testa vektori ir tikai verifikācijas konfigurācijas un nenosaka produkta arhitektūru. Modeļiem ar to pašu loģiku jāiztur testi arī patvaļīgām alternatīvām konfigurācijām, ko Pasūtītājs izveido pieņemšanas laikā.

Pieņemšanas tests	Prasītais demonstrējums
Šūnu datu imports un izcelsme	Importēt šūnu datu kopu, kas satur OCV, ietilpības, pretestības un strāvas kartes. Pārbaudīt mērvienības, metadatus, interpolāciju, apgabala pārbaudes un avotu izsekojamību.
Patvaļīga topoloģija A	Izveidot moduli/bloku ar lietotāja izvēlētu virknes/paralēlā slēguma struktūru, kas nav iekļauta izpildītāja veidnēs. Analītiski pārbaudīt nominālo spriegumu, Ah, Wh, šūnu skaitu un zaru strāvas.
Patvaļīga topoloģija B	Izveidot otru topoloģiju ar paralēlām virknēm un vairākiem bloku zariem. Pārbaudīt strāvas sadalījumu un KCL, salīdzinot ar neatkarīgu aprēķinu.
Topoloģijas modificēšana	Pēc modeļa izveides mainīt moduļa virknē slēgto elementu skaitu un bloku zaru skaitu. Izmaiņas modeļu pirmkoda failos nav pieļaujamas; visām atvasinātajām elektriskajām vērtībām jāatjauninās automātiski.
2-RC ECM impulss	Izpildīt noteiktu strāvas impulsa/miera profilu ar zināmiem R/C parametriem un salīdzināt ar slēgtas formas analītisko/atsauces reakciju.
SOC integrēšana	Veikt uzlādi/izlādi ar nemainīgu strāvu un pārbaudīt, vai kulonu skaitīšanas rezultāts atbilst skaitliskajai pielāidei.
Slodzes sprieguma SOP	Piespiedu kārtā nodrošināt darbību tuvu V_{min}/V_{max} un pārbaudīt automātisku strāvas/jaudas samazināšanu, kas balstīta uz sprieguma zem slodzes prognozi.
Priekšuzlāde	Izmantot sintētisku R-C līdzstrāvas starpkēdi (DC-link) un pārbaudīt priekšuzlādes spriegumu/laiku/strāvu/enerģiju, salīdzinot ar analītisko risinājumu.
Paralēlo zaru nesakritība	Savienot divus bloku zarus ar atšķirīgu OCV/SOC/pretestību. Pārbaudīt paredzamo izlīdzināšanas strāvu un pieslēgšanas atļaujas nosacījuma darbību.
Bloka atslēgšana	Vilces laikā atvienot vienu zaru. Pārbaudīt strāvas pārdali un pārrēķināto pieejamo jaudu/termisko slodzi.
Izmērītā darba cikla atkārtota izpēle	Importēt jaudas-laika darba ciklu no CSV/XLSX vai līdzvērtīga formāta faila un pārbaudīt enerģijas integrāli un elektrisko/termisko reakciju.
Maršruta spēku aprēķins	Izpildīt gadījumu ar nemainīgu ātrumu un nemainīgu slīpumu un salīdzināt kustības pretestību, slīpuma spēku un jaudu pie riteņiem ar manuālu aprēķinu.
Paātrināšanās gadījums	Izpildīt gadījumu ar nemainīgu paātrinājumu un pārbaudīt kinētisko enerģiju, kas aprēķināta ar ekvivalento masu, un maksimālo jaudu.
Rekuperatīvās bremzēšanas gadījums	Piemērot palēnināšanās/lejupslīpes notikumu un pārbaudīt negatīvo mehānisko enerģiju, elektrisko pārveidi, kā arī enerģijas sadalījumu starp baterijas uzņemto un noraidīto enerģiju.
Motora/invertora lietderības koeficients	Izmantot gadījumu ar nemainīgu lietderības koeficientu un pārbaudīt, vai jaudas pārveide ir precīza; pēc tam atkārtot ar lietderības koeficienta karti.
Termiskais gadījums ar koncentrētiem parametriem	Viens termiskais mezgls ar nemainīgu siltuma jaudu un konvekciju; pārbaudīt temperatūras pārejas procesu, salīdzinot ar pirmās kārtas analītisko risinājumu.
Termiskā tīkla gadījums	Divu mezglu šūnas/dzesēšanas plātnes tests ar zināmu siltumvadāmību/siltumietilpību; pārbaudīt reakciju, salīdzinot ar neatkarīgu skaitlisku atsauces risinājumu.
Hidrauliskais zars	Zināma kanāla ģeometrija un plūsma; pārbaudīt Reinoldsa skaitli, berzes koeficientu un spiediena kritumu.
Paralēli dzesēšanas šķidruma zari	Izmantot zarus ar atšķirīgu hidraulisko pretestību un pārbaudīt nevienmērīgu plūsmas sadalījumu un kopīgā spiediena krituma risinājumu.
Gatavība pēc ilgstošas atrašanās aukstumā (cold-soak)	Sākt zem uzlādes/rekuperācijas atļaušanas temperatūras. Pārbaudīt sildītāja enerģiju, sasilšanas laiku un pakāpenisku jaudas atļaušanu atbilstoši konfigurētajām kartēm.

Pieņemšanas tests	Prasītais demonstrējums
Dzesēšanas zuduma kļūme	Lielas jaudas darba cikla laikā iestatīt dzesēšanas šķidruma plūsmu uz nulli. Pārbaudīt temperatūras pieaugumu, jaudas ierobežošanu (derating) un atslēgšanas laiku.
BMS kalibrēšanas datu eksports	Ģenerēt uzlādes, rekuperācijas un izlādes strāvas/jaudas kartes, kā arī sprieguma/temperatūras/aizsardzības sliekšņus ar mērvienībām, avota robežvērtībām un rezervēm.
Šūnu ķīmijas aizstāšana	Aizstāt šūnas datu kopu ar ķīmiski atšķirīgas šūnas datu kopu un atkārtoti izpildīt simulāciju bez izmaiņām modeļu pirmkoda failos.
Atkārtots maršruta cikls	Izpildīt atkārtotus turp un atpakaļ braucienus ar stāvēšanu pieturās/uzlādi. Pārbaudīt SOC un temperatūras stāvokļa pārneši un diennakts enerģijas bilanci.
Montekarlo reproducējamība	Divreiz izpildīt varbūtisku gadījumu ar vienu un to pašu sākumvērtību (seed) un pārbaudīt, vai rezultāti ir identiski; mainīt sākumvērtību un pārbaudīt statistisko variāciju.
Regresijas testu pakete	Izpildīt izpildītāja nodrošinātos automatizētos modeļu testa gadījumus un pārbaudīt dokumentētos sagaidāmos rezultātus atbilstoši §28.1 pielaidēm.

28.1 Pieņemšanas pielaides

Pieņemšanas pielaides: (a) analītiskajiem sintētiskajiem gadījumiem relatīvā kļūda $\leq 0,5 \%$ katram salīdzināmajam lielumam; (b) enerģijas bilances atlikums $\leq 0,1 \%$ no cikla kopējās enerģijas plūsmas; (c) KCL strāvas atlikums $\leq 0,1 \%$ no zara strāvas katrā sasaistes solī; (d) validācijai ar Pasūtītāja iesniegtiem mērījumu datiem – šūnas sprieguma RMSE ≤ 20 mV un temperatūras RMSE ≤ 2 K.

29. Modeļu aprēķinu veikspēja un modeļu failu kvalitāte

- Viena maršruta simulācijai, kas aptver 8 stundas transportlīdzekļa ekspluatācijas ar 1 s izvades izšķirtspēju, jāizpildās ne ilgāk kā 10 minūtēs datorā ar 8 kodolu procesoru un 32 GB RAM (grafiskais procesors nav nepieciešams).
- Šūnu līmenī izšķirtie un Montekarlo aprēķini drīkst aizņemt ilgāku laiku; modelim jānodrošina neatkarīgu gadījumu paralēla izpilde uz visiem pieejamajiem procesora kodoliem un izpildes progresa ierakstīšana žurnālfailā.
- Modeļu pirmkoda failiem jābūt modulāriem, komentētiem un jānodod kopā ar to versiju vēsturi (Git repozitorijs vai līdzvērtīgs).
- Visas fizikālās un kalibrēšanas konstantes jādefinē parametru failos, nevis modeļu pirmkoda failos.
- Jānorāda visas trešo pušu bibliotēkas un licences.
- Piegādātajiem modeļiem standarta aprēķinu veikšanai nedrīkst būt nepieciešams neatklāts periodisks (abonēšanas) mākoņpakalpojums.
- Piegādātajiem modeļiem nedrīkst būt nepieciešams, lai DIGAS iegādātos vai atjaunotu jebkādu licenci. Jebkuram trešās puses komponentam jābūt atvērtā pirmkoda komponentam vai licencētam DIGAS uz beztermiņa pamata bez periodiskām maksām, visas izmaksas iekļaujot līguma cenā.
- Jāiekļauj automatizēti modeļu verifikācijas testi (testa gadījumi ar sagaidāmajiem rezultātiem un §28.1 pielaidēm), kurus DIGAS var palaist.

30. Izpildītāja nodevumi un nodošana

Turpmāk norādītie tehniskie nodevumi ir obligāti, jo tie ir nepieciešami modeļu neatkarīgai turpmākai izmantošanai.

- Darbspējīgi simulācijas modeļi, tostarp grafiskā lietotāja saskarne (§24).
- Pilni rediģējami modeļu pirmkoda faili, parametru faili un scenāriju faili ar būvēšanas un palaišanas instrukcijām.
- Modeļu apraksts un verifikācijas pārskats: vienādojumi, pieņēmumi, derīguma diapazoni un pieņemšanas testu (§28) rezultāti.

A pielikums. Šūnas ievades parametru vārdnīca

Modelim jāatbalsta visi turpmāk norādītie lauki. Katra lauka ievades statuss norādīts iekavās: [obligāts] vai [var atstāt tukšu] (§4.4). Ja lauks ir atstāts tukšs, modelis piemēro noteikto noklusējuma vērtību vai izslēdz atkarīgo aprēķinu un to norāda rezultātos.

Grupa	Lauki [ievades statuss]	Mērvienība / formāts
Identifikācija	Ražotājs, modelis, ķīmijas apzīmējums, redakcija, avota dokumenti [obligāts]	Teksts / metadati
Ģeometrija	Garums, platums, augstums, spaiļu novietojums, virsmas laukumi [obligāts]	m, m²
Masa	Šūnas masa [obligāts]	kg
Nominālie elektriskie parametri	Nominālais spriegums, nominālā/deklarētā ietilpība, nominālā enerģija [obligāts]	V, Ah, Wh
Sprieguma robežas	Ieteicamais/izmantojamais minimums un maksimums; uzlādes/izlādes atslēgšanas spriegums; piegādātāja aizsardzības robežas (var atstāt tukšu) [obligāts]	V
SOC definīcija	Ietilpības atskaites nosacījumi, 0/100% definīcija [obligāts]	metadati
OCV	OCV atkarībā no SOC uzlādei/izlādei un no temperatūras [obligāts]	V karte
Ietilpība	Pieejamā ietilpība (Ah) atkarībā no T, C-rate, SOH [obligāts]	Ah karte
R0 / DCIR	Uzlādes un izlādes līdzstrāvas pretestība atkarībā no SOC/T/impulsa ilguma/strāvas [obligāts]	Ω karte
R1,C1,R2,C2	Dinamiskie ECM parametri atkarībā no SOC/T/virziena/SOH [obligāts]	Ω, F kartes
Kulonu efektivitāte	Uzlādes/izlādes efektivitāte atkarībā no apstākļiem [var atstāt tukšu]	bezdimensiju
Enerģijas efektivitāte	Cikla enerģijas efektivitāte [var atstāt tukšu]	bezdimensiju
Strāvas ierobežojumi	Ilgstošā un impulsa uzlādes, rekuperācijas un izlādes strāva atkarībā no SOC/T/laika [obligāts]	A vai C-rate kartes
Impulsu ilgumi	Atbalstītie strāvas/jaudas laika horizonti [obligāts]	s
Termiskā masa	Īpatnējā siltumietilpība / efektīvā siltumietilpība [obligāts]	J/kg-K vai J/K
Siltumvadītspēja	Virzienatkarīgā vai efektīvā siltumvadītspēja [obligāts]	W/m-K
Termiskais kontakts	Saskarnes/kontakta termiskā pretestība [var atstāt tukšu]	K/W vai m²K/W
Entropijas koeficients	dOCV/dT atkarībā no SOC [var atstāt tukšu]	V/K
Pašizlāde	SOC zudums atkarībā no laika/T [var atstāt tukšu]	%/laiks
Cikliskā novecošana	Ietilpības samazināšanās un pretestības pieauguma testu dati [var atstāt tukšu]	datu kopa/modelis
Kalendārā novecošana	Degradācijas dati atkarībā no glabāšanas SOC/T/laika [var atstāt tukšu]	datu kopa/modelis
Drošības/diagnostikas piezīmes	Piegādātāja ekspluatācijas ierobežojumi un īpaši nosacījumi [var atstāt tukšu]	teksts
Nenoteiktība	Pelaide/sadalījums atlasītajiem parametriem [var atstāt tukšu]	vērtība/sadalījums

B pielikums. Moduļa/bloka/topoloģijas parametru vārdnīca

Parametru grupa	Obligātie lauki
Hierarhija	Komponentu līmeņi un virsējo/pakārtoto elementu struktūra
Elektriskā savienojamība	Virknes/paralēlā slēguma grafs un aktīvie stāvokļi
Šūnu grupēšana	Virknē slēgtās šūnas, paralēli slēgtās šūnas, virknes
Moduļu skaits	Jebkurš vesels skaitlis, ko atbalsta projekts
Bloku skaits	Jebkurš vesels skaitlis, ko atbalsta projekts
Bloku savstarpējais savienojums	Virknē / paralēli / DC/DC / komutējams

Parametru grupa	Obligātie lauki
Kopņu stienis/kabelis	Materiāls, garums, šķēsgriezums, pretestība, temperatūras koeficients
Savienotājs	Pretestība, nominālā vērtība, atrašanās vieta
Drošinātājs	Pretestība, nominālā vērtība, laika-strāvas/I ² t dati
Kontaktori	R _{closed} , nominālais spriegums/strāva, spole/stāvoklis/atgriezeniskā saite
Priekšuzlāde	R _{pre} , C _{bus} , kontaktors, laika limits, sprieguma starpības (delta-V) robeža
Strāvas sensors	diapazons, precizitāte, nobīde/troksnis
Sprieguma sensors	diapazons, precizitāte, nobīde/troksnis
BMS kanāli	šūnu sprieguma kanāli, temperatūras kanāli, CMU grupējums
Balansēšana	tips, strāva, rezistors/jauda, iespējošanas noteikumi
Apvads/atslēgšana	slēdža pretestība, stāvokļu loģika, palīgkontakta atgriezeniskā saite
Bloka korpuss	masa, izmēri, termiskās īpašības
Ekspluatācijas stāvoklis	pieejams / atslēgts / apvadīts / kļūmes stāvoklī
Uzstādīšanas vieta	transportlīdzekļa gals/jumts/apakšrāmis/iekšpuse/pielāgots apzīmējums
Piesaiste termiskajam kontūram	dzesēšanas plātne/zars/kolektors/dzesēšanas šķidrums zona

C pielikums. BMS/CMS kalibrēšanas izvades vārdnīca

Grupa	Kalibrēšanas vienums	Prasītā izvide
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV brīdinājums	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV jaudas ierobežošanas sākums	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV kontrolēta apturēšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV fiksētā (latched) atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	OV atbrīvošana/histerēze	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV brīdinājums	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV jaudas ierobežošanas sākums	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV kontrolēta apturēšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV fiksētā (latched) atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati

Grupa	Kalibrēšanas vienums	Prasītā izvade
Šūnas sprieguma aizsardzība	UV atbrīvošana/histerēze	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	uzlādes zemās temperatūras brīdinājums/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	uzlādes augstās temperatūras brīdinājums/jaudas ierobežošana/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	rekuperācijas zemās/augstās temperatūras robežas	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	izlādes zemās temperatūras brīdinājums/jaudas ierobežošana/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	izlādes augstās temperatūras brīdinājums/jaudas ierobežošana/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	temperatūras izkliedes brīdinājums/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Šūnas temperatūras aizsardzība	dT/dt brīdinājums/atslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	izlādes strāvas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	izlādes jaudas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	uzlādes strāvas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	uzlādes jaudas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	rekuperācijas strāvas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	rekuperācijas jaudas karte	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	ilgstošā un impulsa režīma laika horizonti	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Strāvas/jaudas ierobežojumi	aparātūras strāvas augšējā robeža	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	minimālais/maksimālais SOC	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	rezerves SOC	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	uzlādes mērķa SOC	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	SOE aprēķina parametri	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	SOP laika horizonti	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati

Grupa	Kalibrēšanas vienums	Prasītā izvade
SOC/SOE/SOP	OCV korekcijas iestatījumi	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
SOC/SOE/SOP	ietilpības korekcija atkarībā no T/SOH	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	iespējošanas SOC	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	iespējošanas šūnas sprieguma logs	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	sākuma delta-V	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	beigu delta-V	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	maksimālais balansēšanas laiks	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	maksimālais balansēšanas darba cikls	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	temperatūras bloķēšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Balansēšana	strāvas bloķēšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	bloka OV/UV	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	pārstrāvas pakāpes	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	īssavienojuma aizsardzības saskarne	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	izolācijas/HVIL darbības	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	strāvas sensora ticamības pārbaude	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Bloka aizsardzība	bloka sprieguma ticamības pārbaude	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	maksimālā sākotnējā delta-V	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	priekšuzlādes laika limits	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	minimālā/maksimālā priekšuzlādes strāva	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	K+/K-/Kpre komutācijas secība	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	kontakta sametināšanās diagnostika	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati

Grupa	Kalibrēšanas vienums	Prasītā izvade
Priekšuzlāde/kontaktori	nesaslēdzoša kontakta diagnostika	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Priekšuzlāde/kontaktori	palīgkontaktu atgriezeniskās saites laika limits	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	bloka-kopnes delta-V	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	SOC nesakritība	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	temperatūras nesakritība	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	aktīvo virknē slēgto elementu skaita savietojamība	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	paredzamā izlīdzināšanas strāva	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	pieslēgšanas/atkārtotas pieslēgšanas aizkave	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Paralēlie bloki	vadošā bloka/rezerves pārslēgšanās (failover) parametri (ģenerē sistēmām ar vadošā/rezerves bloka konfigurāciju)	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	dzesēšanas pieprasījuma ieslēgšana/izslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	sildīšanas pieprasījuma ieslēgšana/izslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	dzesētāja pieprasījuma ieslēgšana/izslēgšana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	minimālā dzesēšanas šķidruma plūsma	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	minimālā/maksimālā dzesēšanas šķidruma ieplūdes temperatūra	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	spiediena/plūsmas ticamības pārbaude	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	jaudas ierobežošana atkarībā no šūnas temperatūras	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Termiskā pārvaldība	jaudas ierobežošana dzesēšanas šķidruma sistēmas kļūmes gadījumā	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	CMU laika limits	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	galvenās (master) ierīces laika limits	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	CAN/Ethernet laika limits	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	sensora pārrāvuma/īssavienojuma robežas	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati

Grupa	Kalibrēšanas vienums	Prasītā izvade
Sakari/diagnostika	pārtraukta vada sliekšņi	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	kļūmes apstiprināšanas aizkave (debounce)	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	kļūmes atbrīvošana	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	fiksēšanas (latching)/atiestatīšanas tiesības	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati
Sakari/diagnostika	notikumu reģistrēšanas trigeri	Vērtība/karte + mērvienības + histerēze/apstiprināšanas aizkave (debounce) + avota/rezerves metadati

D pielikums. Termisko/hidraulisko parametru vārdnīca

Apakšsistēma	Prasītās parametru iespējas
Šūnas termiskie parametri	masa, cp(T), kx/ky/kz vai efektīvā siltumvadāmība, virsmas laukumi, siltuma avotu sadalījums
TIM (termiskās saskarnes materiāls)	biezums, k, blīvums/cp, kontakta pretestība (kontakta pretestību var iestatīt uz nulli)
Dzesēšanas plātne	materiāls, biezums, kanālu ģeometrija vai efektīvais UA, masa/cp
Dzesēšanas šķidrums	veids/koncentrācija, p(T), cp(T), μ(T), k(T), sasalšanas temperatūra
Kanāli	garums, hidrauliskais diametrs, raupjums, laukums, vietējo pretestību koeficienti
Kolektors	zaru ģeometrija/empīriskie spiediena krituma koeficienti
Sūknis	Q-Δp līkne, apgriezienu regulēšana, lietderības koeficienta/elektriskās jaudas karte
Sildītājs	jauda, lietderības koeficients, atrašanās vieta, vadības sliekšņi
Radiators/siltummainis	UA vai veiktspējas karte atkarībā no gaisa plūsmas/dzesēšanas šķidruma plūsmas/apkārtējās vides apstākļiem
Dzesētājs (chiller)	dzesēšanas jaudas un COP karte atkarībā no temperatūras/slodzes
Siltumizolācija	biezums, k, cp, blīvums, laukums
Korpuss	masa, cp, virsmu laukumi, ārējais h/ε
Apkārtējā vide	temperatūras laikrinda, ārējā konvekcija, starojums/saules starojums (var iestatīt uz nulli)
Kļūmes	plūsmas samazināšanās, zara aizsprostojums, sūkņa/dzesētāja/sildītāja atteices, sensora nobīde

E pielikums. Kanoniskais dzelzceļa darba ciklu reģistrs

Lauks	Definīcija	Mērvienība
timestamp_s	Hronoloģiskais simulācijas laiks	s
route_chainage_m	Fiziskā pozīcija maršrutā	m
direction	Turp/atpakaļ/pielāgots	teksts
speed_mps	Transportlīdzekļa ātrums	m/s
acceleration_mps2	Garenvirziena paātrinājums	m/s ²
elevation_m	Punkta augstuma atzīme	m
gradient_permille	Lokālais slīpums	‰
curve_radius_m	Lokālais līknes rādiuss (var atstāt tukšu)	m

Lauks	Definīcija	Mērvienība
speed_limit_mps	Lokālais līnijas/transportlīdzekļa ātruma ierobežojums	m/s
vehicle_mass_kg	Vilciena pašreizējā bruto masa	kg
operating_state	vilce/vienmērīga kustība/kustība pēc inerces/bremzēšana/stāvēšana/uzlāde	teksts
traction_force_N	Pieprasītais/faktiskais spēks uz riteņiem	N
wheel_power_W	Pozitīva – vilce, negatīva – bremsēšana	W
aux_power_W	Transportlīdzekļa palīgsistēmu slodze	W
dc_bus_power_W	Līdzstrāvas kopnes neto jaudas pieprasījums	W
battery_power_request_W	Pieprasītais baterijas devums	W
battery_power_actual_W	Baterijas atdotā/uzņemtā jauda	W
regen_mech_W	Mehāniskās negatīvās jaudas potenciāls	W
regen_electrical_W	Elektriski pārveidojamā rekuperācijas jauda	W
regen_battery_W	Baterijas uzņemtā rekuperācijas jauda	W
regen_rejected_W	Neuzņemtā (noraidītā) rekuperācijas jauda	W
friction_brake_W	Mehānisko berzes bremžu jauda	W
ambient_C	Apkārtējās vides temperatūra	°C
charge_available_W	Ārējās uzlādes iespēja	W
generator_power_W	Hibrīdā avota izejas jauda (var atstāt tukšu transportlīdzekļiem bez hibrīdā avota)	W
data_quality_flag	Izmērīts / sintezēts / interpolēts / nederīgs	teksts

F pielikums. Minimālie pieņemšanas scenāriji

Scenārijs	Minimālais saturs
Lieljaudas paātrināšanās	Zems/vidējs/augsts sākotnējais SOC un vairākas apkārtējās vides temperatūras; pārbaudīt spriegumu zem slodzes, strāvu, SOP, siltuma izdalīšanos un jaudas ierobežošanu.
Vienmērīga kustība / uzlādes bilance	Ilgstoša vilce un palīgsistēmu slodze ar ģenerators vai lādētāja devumu; pārbaudīt SOC stabilizēšanos un enerģijas bilanci.
Rekuperatīvā bremsēšana	Augsts un zems SOC, silta un auksta baterija; pārbaudīt uzņemto/neuzņemto rekuperācijas enerģiju un bremžu sistēmu kombinēto darbību (brake blending).
Atkārtots apstāšanās un kustības uzsākšanas cikls	Daudzi paātrināšanās/bremzēšanas notikumi; pārbaudīt siltuma uzkrāšanos un dinamisko polarizāciju.
Ilgstošs kāpums	Ilgstoša liela slodze; noteikt termisko vai sprieguma/strāvas ierobežojumu.
Ilgstošs kritums	Ilgstoša rekuperācijas iespēja; kvantitatīvi novērtēt baterijas uzņemto un neuzņemto enerģiju.
Ilgstoša atrašanās aukstumā (cold soak)	Baterija un dzesēšanas šķidrums sākotnēji ir auksti; noteikt sildītāja enerģiju un laiku līdz noteiktas uzlādes/izlādes/rekuperācijas pieejamības sasniegšanai.
Karsta apkārtējā vide	Augsta apkārtējās vides temperatūra un atkārtota vilce; noteikt dzesēšanas slodzi, šūnu temperatūras gradientu un dzesētāja/sūkņa enerģiju.
Dzesēšanas zudums	Sūkņa vai dzesētāja atteice darbības laikā; noteikt jaudas ierobežošanas (derating)/atslēgšanas laiku un sekas attiecībā uz drošo stāvokli.
Bloka zara atteice	Viens no vairākiem bloku zariem kļūst nepieejams; pārrēķināt maršruta izpildāmību un termisko/strāvas slodzi.
Bloku nesakritība	Paralēli zari ar SOC/temperatūras/pretestības nesakritību; pārbaudīt strāvas sadalījumu un pieslēgšanas atļaujas nosacījumus.
Šūnu parametru izkliede	Ietilpības/pretestības/SOC izkliede virknes ietvaros; noteikt šūnu, kas pirmā kļūst par ierobežojošo, un ietekmi uz balansēšanu.
Alternatīva topoloģija	Topoloģija, ko Pasūtītājs izveidojis pieņemšanas laikā un ko izpildītājs nav izmantojis izstrādes laikā; pārbaudīt risinājuma vispārīgumu.

Scenārijs	Minimālais saturs
Alternatīva šūnu ķīmija	Šūnu datu kopa ar atšķirīgu sprieguma/strāvas/termisko uzvedību; pārbaudīt, ka nav nepieciešamas izmaiņas modeļu pirmkoda failos.
Maršruta telemetrijas atkārtota izspēle	Izmērīti vai sintētiski CSV/XLSX vai līdzvērtīga formāta dati ar neregulāru diskretizāciju; pārbaudīt importu, pārdiskretizācijas žurnālu, enerģijas integrāli un modeļa reakciju.
Maršruta sintēze	Tikai transportlīdzekļa + maršruta + masas ievaddati; pārbaudīt aprēķināto ātrumu/jaudu/enerģiju un rekuperācijas iespējas.
Atkārtots diennakts grafiks	Vairāki reisi, stāvēšana un uzlāde; pārbaudīt stāvokļu pārneši un diennakts enerģijas/siltuma bilanci.

G pielikums. Detalizētas parametru identifikācijas un modeļa kalibrēšanas prasības

Šajā pielikumā noteikta parametru identifikācijas darbplūsmas minimālā tehniskā funkcionalitāte. Tā mērķis ir novērst situāciju, kurā simulācijas modeļi pieņem tikai manuāli ievadītus galīgos parametrus, nenodrošinot reproducējamu ceļu no neapstrādātiem šūnu testēšanas datiem līdz modeļa koeficientiem.

G.1 Testu segmentēšana un priekšapstrāde

- Modelim jāidentificē uzlādes, izlādes, miera stāvokļa, impulsa un relaksācijas segmenti, pamatojoties uz strāvas zīmi un sliekšņu loģiku, vai jāļauj lietotājam tos atzīmēt.
- Neapstrādātajos kanālos jā saglabā sākotnējie paraugu laika zīmogi. Filtrēšanai, diskretizācijas frekvences samazināšanai, nobīdes korekcijai un izlecošo vērtību atmešanai jā rada atvasināti kanāli, nevis jāpārraksta avota dati.
- Strāvas sensora nulles nobīde jānovērtē pārbaudītos miera stāvokļa intervālos. Novērtētā nobīde un koriģētā ampērstundu balance jāuzrāda pārskatos.
- Sprieguma lēcieniem tūlīt pēc strāvas pakāpeniskām izmaiņām jābūt nodalāmiem no lēnākās polarizācijas reakcijas, lai R0 vērtību neizkropļotu RC relaksācija.
- Temperatūra katrā identifikācijas intervālā jā saglabā kā minimālā, maksimālā un vidējā vērtība; testu nedrīkst raksturot ar vienu nominālo temperatūru, ja izmērītā šūnas temperatūra intervāla laikā mainās vairāk nekā par 2 K.
- Jābūt iespējai noraidīt identifikācijas intervālus, ja sprieguma, strāvas vai temperatūras datu kvalitāte neatbilst lietotāja definētam kritērijam.

G.2 Ietilpības un kulonu efektivitātes identifikācija

$$Q_{dis} = \int I_{dis} dt / 3600$$

$$Q_{chg} = |\int I_{chg} dt| / 3600$$

$$\eta_{coul} = Q_{dis} / Q_{chg} \text{ slēgtam atsauces ciklam}$$

Ietilpības rezultāti jāsaista ar testa temperatūru, uzlādes protokolu, izlādes ātrumu, atslēgšanas spriegumiem un miera stāvokļa apstākļiem. Modelis nedrīkst apvienot dažādos apstākļos izmērītas ietilpības vienā skalārā vērtībā bez skaidri noteikta normalizācijas noteikuma.

G.3 OCV un histerēzes identifikācija

Ja ir iesniegti relaksācijas dati, lietotājam jādefinē minimālais miera stāvokļa ilgums vai dV/dt konverģences kritērijs, pēc kura punktu pieņem par kvazi atvērtās ķēdes punktu. Ja ir pieejamas atsevišķas uzlādes un izlādes OCV līknes, modelim jā saglabā abas un jāinterpolē histerēzes stāvoklis vai jāļauj lietotājam BMS robežvērtību aprēķiniem izvēlēties konservatīvo līkni.

$$h_{dot} = -|I|/(Q \cdot \tau_h) \cdot h + k_h \cdot \text{sign}(I)$$

Ja izpildītājs realizē dinamisku histerēzes modeli, drīkst izmantot līdzvērtīgu ierobežotu histerēzes stāvokļa vienādojumu. Tā parametriem jābūt redzamiem lietotājam un aproksimētiem/validētiem.

G.4 Impulsa pretestības identifikācija vairākos laika horizontos

Šūnu bibliotēkā jānošķir momentānā/omiskā pretestība no pretestības, kas noteikta ilgākiem impulsu ilgumiem. Lietotājam jābūt iespējai pieprasīt pretestību vairākos laika horizontos, piemēram, 0.1 s, 1 s, 10 s, 30 s un 60 s, katram laika horizontam, ko aptver iesniegtie testēšanas dati. Dinamiskajā ECM ilgā horizonta vērtības nedrīkst izmantot R0 vietā.

$$R_{app}(\Delta t) = [V_{before} - V(t_0 + \Delta t)] / \Delta I$$

Modelim jāattēlo R_{app} atkarībā no impulsa ilguma un jānosaka, vai izvēlētais divu RC posmu modelis reproducē izmērīto pārejas procesu visā prasītajā dzelzceļa jaudas laika horizontā.

G.5 Divu RC posmu aproksimācijas mērķfunkcija un ierobežojumi

$$J = \sum w_k [V_{\text{meas}}(k) - V_{\text{model}}(k)]^2 + \lambda_{\text{smooth}} \cdot J_{\text{smooth}} + \lambda_{\text{prior}} \cdot J_{\text{prior}}$$

- R0, R1, R2, C1 un C2 jāierobežo ar pozitīvām vērtībām.
- Laika konstantes $\tau_1=R1C1$ un $\tau_2=R2C2$ jāsakārto vai citādi jāierobežo, lai novērstu parametru samainīšanos starp blakus esošiem SOC/T punktiem.
- Svari drīkst piešķirt prioritāti dzelzceļa darbībai būtiskiem lielas strāvas pārejas procesiem, taču svēršana jādokumentē.
- Aproksimācijas kvalitātes rādītājos jāiekļauj RMSE, maksimālā kļūda un atlikums atkarībā no laika/strāvas/SOC.
- Aproksimācijas kvalitāte jāattēlo tajā pašā sprieguma skalā, kas izmantota aizsardzības robežvērtībām, lai būtu redzama tās inženiertehniskā nozīme.
- Ja identificētā parametru kopa ir slikti nosacīta vai nav viennozīmīga, modelim tas jāatzīmē, nevis jāuzrāda maldīga precizitāte.

G.6 Identificēto parametru interpolācija pēc temperatūras un SOC

Parametru virsmas jāveido no diskrētiem testa punktiem. Modelim jāizmanto pa daļām lineāra interpolācija kā caurskatāms bāzes risinājums. Tam jā saglabā sākotnējie aproksimētie mezgli un jānovērš negatīva pretestība/kapacitāte un lokāli ekstrēmi, kuru nav aproksimētajos mezglos.

G.7 Validācijas datu kopu nodalīšana

Modelim jāļauj katru datu kopu atzīmēt kā identifikācijas vai validācijas datu kopu. Modeļa precizitāte jāuzrāda atsevišķi validācijas datiem. Modelis, kas kalibrēts un validēts ar tieši tiem pašiem paraugiem, jāapzīmē kā aproksimācijas reproducēšana, nevis neatkarīga validācija.

H pielikums. Detalizēta BMS/CMS karšu ģenerēšanas un aizsardzības logika

H.1 Dinamisko strāvas karšu iegūšana

Karšu ģenerators mērķis ir pārveidot šūnas pamatspējas BMS ieviešamās robežvērtībās. Katram SOC-temperatūras atbalsta punktam algoritmam jānosaka pieļaujamā strāva, ņemot vērā visus attiecināmos ierobežojumus, un jāidentificē aktīvais ierobežojums.

$$I_{\text{allow,dis}}(\text{SOC},T,\Delta t) = \min\{I_{\text{supplier}}, I_{\text{voltage}}, I_{\text{thermal}}, I_{\text{hw}}, I_{\text{project}}\}$$
$$|I_{\text{allow,chg}}(\text{SOC},T,\Delta t)| = \min\{|I_{\text{supplier,chg}}|, |I_{\text{voltage,max}}|, |I_{\text{thermal,chg}}|, |I_{\text{hw}}|, |I_{\text{project}}|\}$$

No sprieguma ierobežojuma atvasinātā strāva jāaprēķina, izmantojot dinamisko ECM (R0 un RC posmus) izvēlētajā laika horizontā.

$$V_{\text{pred}}(\Delta t) = \text{OCV} - I \cdot R_0 - I \cdot R_1 \cdot (1 - \exp(-\Delta t / \tau_1)) - I \cdot R_2 \cdot (1 - \exp(-\Delta t / \tau_2)) + \text{state_memory_terms}$$

Rekuperatīvajai uzlādei tā pati procedūra jāizpilda neatkarīgi, jo piegādātājs var norādīt rekuperatīvās/impulsu uzlādes robežapgabalu, kas atšķiras no ilgstošas uzlādes robežapgabala. Ar vienu simetrisku C-rate robežvērtību nepietiek.

H.2 Šūnu sprieguma aizsardzības projektēšana

Modeļa kalibrēšanas daļai jāatbalsta vismaz pieci funkcionālie līmeņi pārspriegumam un zemspriegumam: informācija/brīdinājums, jaudas ierobežošanas (derating) sākums, kontrolēta darbības robeža, aizsardzības atslēgšana un fiksētā (latched) smagas pakāpes atslēgšana. Projektos drīkst izmantot mazāk līmeņu, taču pamatā esošajai funkcionalitātei jābūt pieejamai. Histerēze un apstiprināšanas aizkave (debounce) jādefinē gan aktivizēšanai, gan atbrīvošanai. Sprieguma aizsardzības iestatījumi jāpārbauda attiecībā pret lādētāja/invertora vadības precizitāti un mērījumu pielaidi.

H.3 Temperatūras aizsardzības projektēšana

Temperatūras robežvērtībām jābūt noteiktām atsevišķi katram strāvas virzienam. Uzlādei, rekuperatīvajai uzlādei un izlādei var būt atšķirīgi zemās un augstās temperatūras diapazoni. Modelim papildus jāģenerē temperatūras izkliedes kritēriji un temperatūras izmaiņu ātruma kritēriji. Jābūt iespējai atvasināt jaudas ierobežošanas (derating) līkni no strāvas kartēm, nevis piemērot tikai bināru termisko atslēgšanu.

H.4 Mērījumu pielāgšanas un drošības joslas aprēķins

$\text{Limit_BMS} = \text{Limit_cell} - M_{\text{engineering}} - M_{\text{measurement}} - M_{\text{dynamic}}$ [augšējai robežvērtībai]

$\text{Limit_BMS} = \text{Limit_cell} + M_{\text{engineering}} + M_{\text{measurement}} + M_{\text{dynamic}}$ [apakšējai robežvērtībai]

Rezerves komponentēm jābūt redzamām atsevišķi. Mērījumu rezervē jāiekļauj šūnas sprieguma mērījuma precizitāte, temperatūras sensora precizitāte, strāvas sensora kļūda un sinhronizācijas nobīde/aizkave. Dinamiskajā rezervē jāņem vērā sprieguma pārsniegums un termiskā aizture starp sensoru un šūnas kodolu. Modelis nedrīkst slēpt visas rezerves vienā nepaskaidrotā koeficientā.

H.5 Balansēšanas prasību aprēķins

Modelim jānovērtē pasīvās balansēšanas laiks, pamatojoties uz šūnu ietilpības/SOC nesakritību un balansēšanas strāvu. Tam jānosaka, vai izvēlētajā balansēšanas strāva koriģē paredzamo ražošanas vai novecošanās izraisīto izkliedi pieejamajos stāvēšanas/uzlādes periodos (aprēķinātais balansēšanas laiks $\leq$ pieejamais laiks).

$$t_{\text{balance}} \approx \Delta Q / I_{\text{balance}} = Q_{\text{cell}} \cdot \Delta \text{SOC} / I_{\text{balance}}$$

Balansēšanas rezistoru siltuma izkliede jāiekļauj kā lokāls moduļa siltuma avots, kad balansēšana ir aktīva.

H.6 Priekšuzlādes un kontaktoru kalibrēšana

- Maksimālā pieļaujamā sprieguma starpība starp bloku un kopni pirms priekšuzlādes sākuma.
- Maksimālā pieļaujamā sprieguma starpība pirms galvenā kontaktora saslēgšanas.
- Priekšuzlādes laika limits, kas atvasināts no R_{pre} , C_{bus} un minimālā paredzamā bloka sprieguma.
- Rezistora maksimālā jauda un enerģija vienā notikumā, ar atjaunošanās/atdzišanas pieņēmumiem.
- Minimālās strāvas vai sprieguma pieauguma kritērijs, ko izmanto pārtrauktas priekšuzlādes ķēdes noteikšanai.
- Sprieguma uzvedība, ko izmanto sametināta galvenā kontaktora diagnosticēšanai.
- Palīgkontakta neatbilstība un apstiprināšanas aizkaves (debounce) laiks.

H.7 Vairāku bloku strāvas robežvērtību arbitražā

Vairākiem paralēliem bateriju zariem transportlīdzekļa līmenī pieejamā uzlādes/izlādes jauda jāaprēķina no atsevišķo zaru robežvērtībām un faktiskā strāvas sadalījuma risinājuma. Sistēmas robežvērtību nedrīkst iegūt, vienkārši reizinot viena reprezentatīva bloka robežvērtību ar bloku skaitu, ja bloku SOC, temperatūra, SOH vai topoloģija atšķiras.

$$P_{\text{sys,allow}} = \sum_k V_{\text{bus}} \cdot I_{k,\text{allow}} \text{ ievērojot zaru un kopējās kopnes ierobežojumus}$$

Kalibrēšanas izvaddatos jāiekļauj zaru atslēgšanas uzvedība un no tās izrietošās samazinātās transportlīdzekļa jaudas robežvērtības katram pieļaujamajam bloku skaita stāvoklim.

I pielikums. Detalizēti termiskās pārvaldības izmēru noteikšanas aprēķini

I.1 Termiskās pretestības ķēde no šūnas līdz dzesēšanas šķidrumam

$$R_{\text{cell-coolant}} = R_{\text{cell,int}} + R_{\text{cell/TIM}} + t_{\text{TIM}} / (k_{\text{TIM}} \cdot A_{\text{contact}}) + R_{\text{plate,cond}} + 1 / (h_{\text{fluid}} \cdot A_{\text{wet}})$$

Modelim jāļauj katrai moduļu/šūnu grupai norādīt atsevišķus kontakta laukumus un pretestības. No CFD vai testiem iegūtas efektīvās pretestības drīkst aizstāt ģeometriskos locekļus, taču jā saglabā to avots un piemērojamais plūsmas/temperatūras diapazons.

I.2 Nepieciešamā dzesēšanas šķidruma masas plūsma atbilstoši siltuma slodzei

$$m_{\text{dot_required}} \geq Q_{\text{dot_total}} / [c_p \cdot \Delta T_{\text{coolant,allowed}}]$$

Tā ir tikai sākotnējā izmēru noteikšanas robeža. Galīgajai plūsmai jāatbilst arī lokālo siltuma pārnese koeficientu, sadalījuma pa zariem un sūkņa/sistēmas spiediena krituma ierobežojumiem. Modelim jāuzrāda gan pēc siltumietilpības noteiktā plūsmas robeža, gan hidrauliski aprēķinātais darba punkts.

I.3 Pārejas režīma siltumietilpība un impulsu buferēšana

$$\Delta T_{\text{adiabatic}} \approx Q_{\text{pulse}} / C_{\text{thermal,effective}}$$

Īsu dzelzceļa paātrināšanās/rekuperācijas impulsu laikā siltumu var absorbēt termiskā masa, dzesēšanas šķidrumam tūlītēji aizvadot tikai ierobežotu siltuma daudzumu. Tāpēc modelim jāaprēķina gan momentālais temperatūras pieaugums impulsa laikā, gan ilgtermiņa siltuma novadīšana. Tam katram darba cikla segmentam jānosaka, vai dzesēšanas sistēmu ierobežo plūsma, UA vai termiskā masa.

I.4 Uzsildīšana pēc ilgstošas atrašanās aukstumā (cold soak)

$$t_{\text{heat}} \geq E_{\text{required}} / (P_{\text{heater}} \cdot \eta_{\text{effective}} - Q_{\text{dot_loss,avg}})$$

Tā kā siltuma zudumi mainās atkarībā no temperatūras, faktiskais laiks jāiegūst no pārejas režīma termiskā tīkla. Modelim atsevišķi jāuzrāda šūnu, dzesēšanas šķidruma, plātņu/korpusa masu uzsildīšanai izmantotā enerģija un apkārtējā vidē zaudētā enerģija.

I.5 Dzesētāja/radiatora jaudas noteikšana

Modelim jāaprēķina maksimālā ilgstošā siltuma novadīšanas jauda, kas nepieciešama izvēlētajos karstas apkārtējās vides apstākļos, un pārejas režīma maksimums. Tam jānosaka, vai ir nepieciešams dzesētājs vai pietiek ar radiatora/apkārtējās vides dzesēšanu. Ja izmanto dzesētāju, modelim jāuzrāda siltuma slodze, elektriskā slodze un lietderības koeficients (COP) darba cikla laikā.

$$P_{\text{BTMS,total}} = P_{\text{pump}} + P_{\text{fans}} + P_{\text{chiller}} + P_{\text{heater}} + P_{\text{controls}}$$

$$E_{\text{BTMS,day}} = \int P_{\text{BTMS,total}} dt \text{ definētā ekspluatācijas grafika laikā}$$

I.6 Pārskati par spiediena kritumu un sūkņa rezervi

Katram darba punktam izvaddatos jānorāda sūkņa apgriezieni, kopējā plūsma, plūsmas zaros, sistēmas spiediena kritums, sūkņa spiedinaugstuma rezerve un sūkņa elektriskā jauda. Lietotājam jābūt iespējai hidrauliskajai pretestībai piemērot piesārņojuma/novecošanās koeficientu. Zars ar nepieņemami mazu plūsmu jāidentificē arī tad, ja kopējā bloka plūsma saglabājas nominālā līmenī.

I.7 Termiskās gatavības kritēriji

Lietotājam jādefinē atsevišķi gatavības kritēriji vilces izlādei, rekuperatīvajai bremzēšanai, parastajai uzlādei un ātrajai uzlādei. Tādējādi bloku var uzskatīt par pieejamu mazas jaudas kustībai, kamēr tas vēl nav pieejams pilnai rekuperācijai vai uzlādei ar lielu strāvu. Modelim

jāaprēķina pirmais brīdis, kurā katrs gatavības stāvoklis tiek sasniegts, un attiecīgais patērētās elektriskās/sildītāja enerģijas daudzums.

I.8 Diennakts termiskās enerģijas budžets

- Iepriekšējās uzsildīšanas enerģija aukstajai palaišanai.
- Sildīšana/dzesēšana ekspluatācijas laikā.
- Dzesēšana uzlādes laikā.
- Dzesēšana pēc darbības beigām, ja iespējota.
- Sūkņa/ventilatora gaidstāves enerģija.
- Nakts termiskās uzturēšanas enerģija, ja konfigurēta.
- Kopējā BTMS enerģija procentos no vilces baterijas caurplūdes enerģijas.
- Jūtīgums pret siltumizolācijas līmeni un iepriekšējās sagatavošanas (preconditioning) stratēģiju.