

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

Genādijs Moskvins

Elektropiedziņas modelēšana

Jelgava 2008

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

Genādijs Moskvins

Elektropiedziņas modelēšana

Mācību – metodiskais līdzeklis studiju priekšmetā
Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa

Jelgava 2008



Mācību līdzeklis sagatavots un izdots ESF projekta „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē” ietvaros, projektu līdzfinansē Eiropas Savienība.

Moskvins G. Elektropiedziņas modelēšana: mācību metodiskais līdzeklis studiju priekšmetā „Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa” – Jelgava: LLU, 2008. – 51 lpp.

Mācību līdzekļa „Elektropiedziņas modelēšana” mērķis ir parādīt elektropiedziņas un elektrisko mašīnu virtuālas modelēšanas iespējas Matlab datorprogrammu pielikuma Simulink vidē. Izmantojot Matlab virtuālās modelēšanas programmas un algoritmus un uzskatāmā formā ilustrējot darba un pārējas režīmu imitāciju plašā diapazonā, mācību metodiskais līdzeklis palīdz dziļāk saprast pielietojamo matemātisko modeļu būtību un atbilstošus fizikālos procesus, kas noriet modelējamā elektropiedziņas struktūrā ar atšķirīgiem tehniskiem, elektriskiem un fizikāliem parametriem. Modelēšanas pamatā ir matemātiskie modeļi, uz kuru bāzes tiek veidotas algoritmiskās struktūrshēmas, kas dod iespēju veikt dažādu elektropiedziņas sistēmu aprēķinus un optimizāciju, kā arī dinamisko pārējas procesu imitāciju. Elektropiedziņas pētāmie modeļi tiek sastādīti no tipveida posmiem, izmantojot jaudas, enerģijas, masas, momenta utt., bilances vienādojumus. Pielietojot tipveida algoritmus tas dod iespēju modelēšanas gaitā izveidot, izanalizēt un aprakstīt jebkuru elektropiedziņas darbības modeļi dažādos ekspluatācijas režīmos. Mācību līdzeklis paredzēts lauksaimniecības enerģētikas bakalauru studiju studentiem, kuri apgūst teorētiskos un praktiskos pamatus mācību priekšmetā „Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa”.

ISBN 978-9984-784-43-4

© Genādijs Moskvins
© LLU Tehniskā fakultāte

Saturs

1. Ievads	4
2. Elektropiedziņas datormodelēšanas principu analīze	4
3. <i>Simulink</i> datorprogrammas apraksts	4
4. Bibliotēkas <i>SimPowerSystems</i> apraksts	5
5. Elektropiedziņas modelēšanas bibliotēkas struktūra un īpatnības	6
6. <i>SimPowerSystem</i> modeļa aprēķināšanas algoritms	6
7. Bloku apraksts	8
8. Integrēšanas metodes izvēle	19
9. Elektropiedziņas asinhronā dzinēja modelēšana	19
9.1. Izmantoto programmas bloku apraksts	19
9.2. Elektrisko mašīnu matemātisko modeļu vienādojumi	20
10. Elektropiedziņas trīsfāzu asinhronā dzinēja parametru modelēšanas un aprēķina piemērs	24
11. Asinhronā dzinēja darba režīmu modelēšana	34
12. Asinhronā dzinēja mehāniskas raksturlīknes konstruēšana	37
13. Asinhronā dzinēja darba raksturlīkņu konstruēšana	37
14. Asinhronā dzinēja bremzēšanas raksturlīknes konstruēšana	37
15. Elektropiedziņas modelēšanas piemērs. Asinhronā dzinēja АИР90L2 palaišanas un stacionāra režīmu modelēšana	38
15.1. Asinhronā dzinēja АИР90L2 palaišanas strāvas ierobežošana	40
15.2. Asinhronā dzinēja АИР90L2 darba raksturlīkņu veidošana	42
15.3. Asinhronā dzinēja АИР90L2 bremzēšanas laika modelēšana	45
15.4. Īsslēguma ietekmes uz asinhronā dzinēja darbību modelēšana	48
16. Noslēgums	50
17. Literatūra	51

1. Ievads

Efektivitātes jautājums vienmēr ir un būs aktuāls. Elektriskās enerģijas racionālas izmantošanas jomā svarīgākais ir maksimāli samazināt zudumus elektrotīklā, apakšstacijās, sadales punktos un panākt to efektīvāku izmantošanu. Ļoti liela nozīme ir tieši optimālas elektriskās mašīnas izvēlei konkrēta uzdevuma risināšanai. Ņemot vērā problēmas sarežģītību, šim nolūkam tradicionāli tiek izmantotas tādas metodes, kā matemātiskā un fizikālā modelēšana un eksperimentālie izmēģinājumi pārbaudes standos. Matemātiskās modelēšanas aprēķini ir pietiekami precīzi, bet prasa daudz laika, jo ir zinātnes ietīpīgi. Lai tos atvieglotu parasti aprēķini tiek vienkāršoti un rezultātā tas samazina modeļu precizitāti. Izmēģinājumi pārbaudes standos atļauj pārbaudīt visus elektriskās mašīnas darba aspektus tomēr prasa lielus ieguldījumus, organizēt eksperimentus ar dārgām tehnoloģiskām iekārtām ražošanas apstākļos ir problemātiski un reizēm pat neiespējami.

Skaitļošanas tehnikas un matemātiskās programmatūras attīstība pēdējos gados ļauj būtiski papildināt elektropiedziņas un elektrisko mašīnu teoriju, pateicoties matemātisko modeļu komplicēšanai un precizēšanai. Tāpēc tiek piedāvāta jauna modelēšanas metode – virtuālā modelēšana. Virtuālās modelēšanas pamatā ir matemātiskais modelis, uz kura bāzes tiek veidotas algoritmiskās struktūrshēmas, kas dod iespēju veikt dažādu elektropiedziņas sistēmu aprēķinus un optimizāciju, dinamisko pārejas procesu imitāciju. Šī mācību līdzekļa mērķis ir parādīt elektropiedziņas un elektrisko mašīnu virtuālās modelēšanas iespējas MATLAB pielikumā *Simulink* vidē. Mācību līdzeklis paredzēts lauksaimniecības enerģētiskās studiju programmas priekšmeta „Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa” apguvei. To varēs izmantot arī citu inženierzinību specialitāšu studenti un maģistranti.

2. Elektropiedziņas datormodelēšanas principu analīze

Elektropiedziņas vadāmie objekti ir elektrodzinēji, kas nodrošina tehnoloģisko iekārtu, rūpniecisko robotu, darbgaldū, transportieru, liftu, ceļšanas mašīnu utt. darbību. Tā kā veikt eksperimentus ar dārgām tehnoloģiskām iekārtām ražošanas apstākļos ir problemātiski un reizēm neiespējami, tad elektropiedziņas projektēšanā lietderīgi pielietot modelēšanas metodi.

Bez tam, modelēšanas gaitā uzskatāmā formā imitējot darba un pārējas režīmus plašā diapazonā, var vieglāk saprast matemātisko modeļu būtību un atbilstošus fizikālos procesus, kas notiek modelējamajā objektā. Tāpēc vispirms sastāda matemātiskos modeļus, uz kuru bāzes veido sistēmas algoritmiskās struktūrshēmas, kas dod iespēju veikt elektrisko mašīnu dinamisko pārejas procesu imitāciju MATLAB vidē, izmantojot attiecīgas datorprogrammas. Elektropiedziņas sistēmu sadala posmos un katram no tiem sastāda vienādojumu, kas atspoguļo tos fizikālos procesus, kas norisinās dotajā pētāmā objekta posmā. Elektropiedziņas pētāmo modeli var sastādīt no relatīvi neliela skaita tipveida posmiem. Elektropiedziņas elementu, elektrisko mašīnu un ierīču dinamikas vienādojumus sastāda, izmantojot jaudas, enerģijas, masas, momenta utt., bilances vienādojumus. Katra tipveida elektropiedziņas elementa īpašības apraksta noteikts algoritms, pēc kura elektropiedziņas sistēmā var darboties elektriskās mašīnas ar atšķirīgu uzbūvi, tehniskiem un elektriskiem parametriem un atšķirīgām fizikālajām īpašībām. Tas dod iespēju, izmantojot nelielu skaitu tipveida algoritmu, aprakstīt jebkuru elektropiedziņas struktūru.

3. *Simulink* datorprogrammas apraksts

Simulink ir datorprogrammas MATLAB pielikums. Modelējot elektropiedziņas sistēmas izmantojot *Simulink* tiek realizēts vizuālas programmēšanas princips, saskaņā ar to

lietotājs ar standarta bloku palīdzību veido ierīces modeli un veic aprēķinus. Atšķirībā no citām modelēšanas programmām lietotājam nav pilnībā jāapgūst programmēšanas valoda un matemātiskās skaitļošanas metodes, pietiek ar vispārīgām datorzinību prasmēm un, dabīgi, attiecīgām darba nozares zināšanām.

Simulink grafiskais modelis, kas tiek veidots kā algoritmiska blokhēma, ļauj viegli mainīt sistēmas struktūru, izmainīt saites starp blokiem vai iekļaut jaunus blokus un savienot tos ar esošajiem. Blokhēma uzskatāmi parāda sistēmas modeļa uzbūvi, kas ļauj padziļināt sapratni par tajā notiekošajiem procesiem.

Simulink dod iespēju modelēt hibrīdās sistēmas, kas sastāv no nepārtrauktā laika un diskrētā laika blokiem, piemēram, nepārtrauktā laika process tiek vadīts ar diskrētā laika (ciparu) kontrolleri.

Izmantojot t.s. *S-functions* (sistēmas funkcijas) blokus ir iespējams modelēt kā apakšsistēmu, kas izveidota kā algoritms vai programma, piemēram, kā analizatora vai kontrolera algoritms. Algoritmu vai programmu var uzrakstīt MATLAB valodā vai C++, Fortran un Ada.

Sīkāk mēs *Simulink* bibliotēku un tās iespējas neapskatīsim, jo mūs vairāk interesē bibliotēka *SimPowerSystems*, kura ir viena no *Simulink* papildus bibliotēku kopas. Tā tiek apskatīta zemāk.

4. Bibliotēkas *SimPowerSystems* apraksts

Bloku bibliotēka *SimPowerSystems* ir viena no *Simulink* papildbibliotēku kopas, kas ir orientēta konkrēto sistēmu modelēšanai un imitācijai. *SimPowerSystems* iekļauj sevī bloku komplektu elektrotehnisko iekārtu modelēšanai. Bibliotēkā atrodas pasīvo un aktīvo elektrotehnisko elementu, enerģijas avotu, elektrodzinēju, transformatoru, elektropārvades līniju u.c. iekārtu modeļi. Ir arī nodaļa, kura satur blokus, kas paredzēti enerģētisko elektronikas iekārtu modelēšanai, ieskaitot to vadības sistēmu modelēšanu. Izmantojot *Simulink* un *SimPowerSystems* specialās iespējas, lietotājs var ne tikai imitēt iekārtas darbu laika vienības apgabalā, bet arī veikt šo iekārtu daudzpusīgu analīzi. Piemēram, lietotājam ir iespēja izrēķināt maiņstrāvas sistēmas stacionāro režīmu, veikt ķēdes posma impedances aprēķinu (pilnas pretestības), iegūt frekvences raksturlīkni, analizēt sistēmas stabilitāti, kā arī izveidot strāvu un spriegumu harmonisko analīzi.

SimPowerSystems neapšaubāma priekšrocība ir tā, ka sarežģītas elektrotehniskas sistēmas var modelēt, apvienojot imitācijas (fenomenoloģisko) un strukturālās modelēšanas metodes. Piemēram, elektriskās enerģijas pusvadītāju pārveidotāja enerģētisko daļu var konstruēt izmantojot *SimPowerSystems* blokus, bet to vadības sistēmu – izmantojot parastos *Simulink* blokus, kuri atspoguļo tikai to darbības algoritmu, nevis to elektrisko shēmu. Tāda pieeja, atšķirībā no shēmu tehniskās modelēšanas paketēm, ļauj ievērojami samazināt visu modeli, kas vienlaikus nozīmā paaugstināt to darbspēju un darbības ātrumu. Izņemot to, modeļos, kuros ir izmantoti *SimPowerSystems* (tālāk *SPS*-modeļi) var izmantot pārējo *Simulink* bibliotēku blokus, kā arī MATLAB funkcijas. Tas sniedz gandrīz neierobežotas iespējas elektrotehnisko sistēmu modelēšanā.

Bibliotēka *SimPowerSystems* ir diezgan plaša. Gadījumā, ja tomēr vajadzīgā bloka tajā nav, lietotājam ir iespēja izveidot to, kā izmantojot jau eksistējošus blokus, realizējot *Simulink* apakšsistēmu izveidošanas iespējas, tā arī balstoties uz *Simulink* pamatbibliotēkas blokiem un vadāmiem strāvas vai sprieguma avotiem.

Tādējādi, *SimPowerSystems Simulink* sastāvā pašlaik var uzskatīt par vienu no labākajām elektropiedziņas iekārtu un sistēmu modelēšanas paketēm.

5. Elektropiedziņas modelēšanas bibliotēkas struktūra un īpatnības

Bibliotēkai *SimPowerSystems* ir sešas pamatnodaļas:

- *Electrical Sources* – elektriskās enerģijas avoti,
- *Measurements* – mērīšanas un kontroles ierīces,
- *Elements* – elektrotehniskie elementi,
- *Power Electronics* – enerģētiskās elektronikas iekārtas,
- *Machines* – elektriskās mašīnas,
- *Powerlib Extras* – papildus elektrotehniskās ierīces.

Izmantojot šo nodaļu blokus, bibliotēkas lietotājs var izveidot pietiekami sarežģītus elektropiedziņas un atsevišķo elektrisko mašīnu modeļus.

SPS-modeļu veidošanas metodika neatšķiras no *Simulink* bāzes bibliotēku modeļu veidošanas metodikas. Tāpat kā parastam *Simulink* modelim (*S*-modelim), ir nepieciešams veikt bloku izvietošanu shēmā, uzdot to parametrus, savienot blokus un noteikt modeļa aprēķina parametru kopu. *SPS*-modeļiem ir pieejams paātrināts aprēķina režīms un visas *Simulink* iespējas, ieskaitot *Simulink Performance Tools* instrumentu krājumu, lineāro analīzi, atklūdotāju utt. Tomēr *SPS*-modeļiem ir arī dažas īpatnības:

1. *SPS*-bloku ieejas un izejas, atšķirībā no *Simulink* blokiem, neatspoguļo signāla pārraides virzienu, tie faktiski ir ekvivalenti elektriskajiem kontaktiem. Tādējādi, elektriskā strāva var caur bloka ieeju un izeju plūst divos virzienos.
2. Savienošanas līnijas starp blokiem pēc būtības ir elektriskie vadi, caur tiem strāva var plūst divos virzienos. *Simulink* modeļos informatīvs signāls izplatās tikai vienā virzienā – no viena bloka izejas otra bloka ieejā.
3. *Simulink* bloki un *SimPowerSystems* bloki nevar būt tieši pievienoti viens otram. Signālu no *S*-bloka var nosūtīt uz *SPS*-bloku tikai caur vadāmiem strāvas vai sprieguma avotiem, bet otrādi – caur strāvas vai sprieguma mērītājiem.
4. Vairākas līnijas (vadi) var būt savienotas viena ar otru.
5. Aprēķinot shēmu, kas satur nelineārus blokus, vajag izmantot sekojošas metodes:
 - *ode15s* – daudzoļu mainīgas kārtas (no1 līdz 5) metode, kas izmanto skaitliskās diferencēšanas formulas,
 - *ode23tb* – apslēpta *Runge-Kutta* metode aprēķina sākumā un metode, kas izmanto apgrieztas otras kārtas diferencēšanas formulas, tālāk, tām ir labāki ātrdarbības rezultāti.

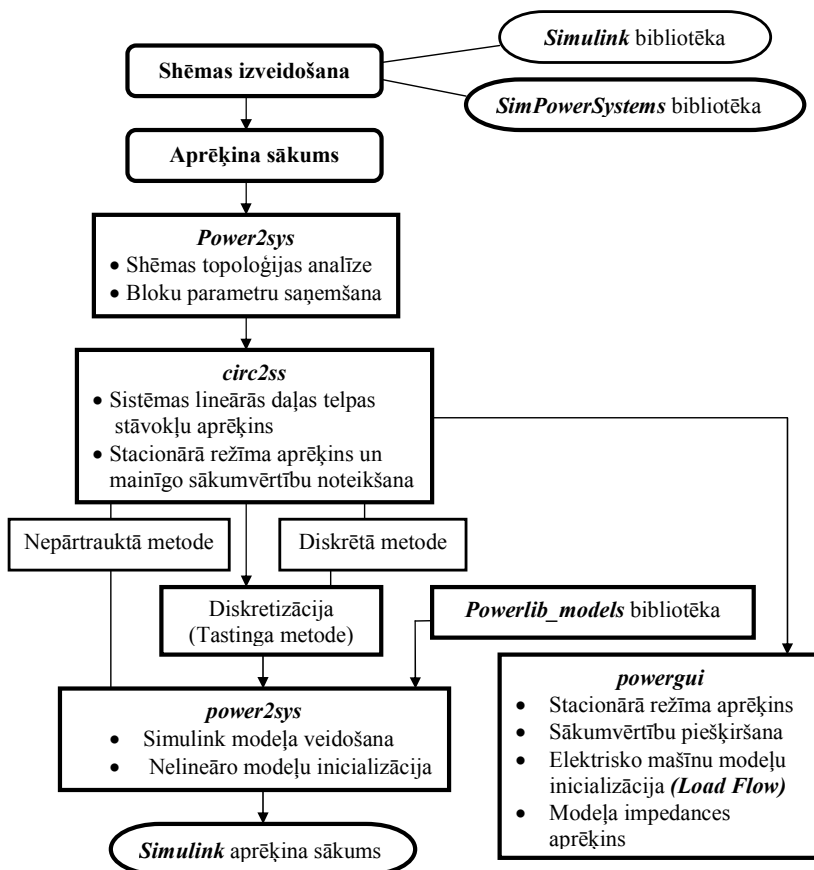
6. *SimPowerSystem* modeļa aprēķināšanas algoritms

Izveidotais *SimPowerSystem* modelis ir aprēķināts tāpat, kā jebkurš cits *Simulink* modelis. Pirms katra aprēķina sākuma norisinās modeļa inicializācija. Inicializācijas laikā tiek aprēķināts elektriskās shēmas telpas stāvokļu modelis un veidots ekvivalents modelis, kuru *Simulink* varēs aprēķināt. Funkcija *Power2sys* uzsāk šo procesu (1. att.).

Funkcijas *power2sys* inicializāciju var sadalīt 4 etapos:

- *SimPowerSystem* bloku kārtošana, bloku parametru saņemšana, shēmas topoloģijas analīze un automātiska numuru piešķiršana shēmas mezgliem. Kārtošanas laikā bloki tiek sadalīti divās grupās: lineāri un nelineāri.
- Sistēmas lineāras daļas telpas stāvokļu modeļa aprēķinu izpilda funkcija *circ2ss*. Šajā etapā tiek izveidots stacionāra režīma aprēķins un notiek mainīgo sākumvērtību noteikšana.

- Jā ir uzdota modeļa diskretizācija, tad ir noteikts shēmas diskrētais modelis stāvokļu telpā. Tiek izmantota *Tastinga metode*.
- Tiek veidots *Simulink* modelis un ierakstīts vienā no mērīšanas blokiem. Tas nozīmē, kā shēmā jābūt vismaz vienam mērīšanas blokam (*Current Measurment*, *Voltage Measurment*, *Three-Phase VI Measurment* vai *Multimeter*). Saite starp *Simulink* ekvivalento modeli un mērīšanas blokiem tiek realizēta ar bloku *Goto* un *From* palīdzību.



1. att. *SymPowerSystems* modeļa aprēķināšanas algoritms¹

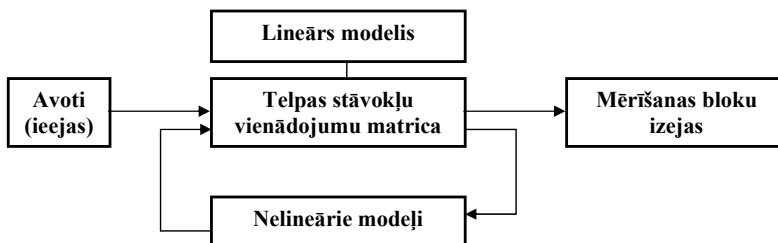
Ekvivalenti *Simulink* modelī tiek izmantots bloks *State-Space* vai bloks *S-function* lai modelētu sistēmas lineāro daļu. *SimPowerSystems* bloku modelēšanai tiek izmantoti to

¹ MATLAB pēdēja versijā funkciju *power2sys* un *circ2ss* nosaukumi ir izmainīti uz *POWER_ANALYZE* un *POWER_STATESPACE* attiecīgi.

prototipi no bibliotēkas *Powerlib models*. Elektriskās enerģijas avotu modelēšanai tiek izmantoti bibliotēkas *Simulink* avotu bloki *Sources*.

Bloks *Powergui*, ievietots modelī, atļauj piešķirt modeļa mainīgajiem sākumvērtības, izpildīt stacionāra režīma aprēķinu, veikt shēmas, kas satur elektriskās mašīnas, inicializāciju un atrast ķēdes pilno pretestību (impedanci).

Nelineāro modeļu saite ar *Simulink* modeli parādīta 2. att. Nelineārie modeļi tiek pieslēgti pie *Simulink* modeļa lineārās daļas ar atgriezeniskās saites ķēdēm.

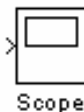


2. att. Nelineāro modeļu saite ar *Simulink* modeli

7. Bloku apraksts

Scope	Oscilogrāfs
-------	-------------

Piktogramma:



Uzdevums:

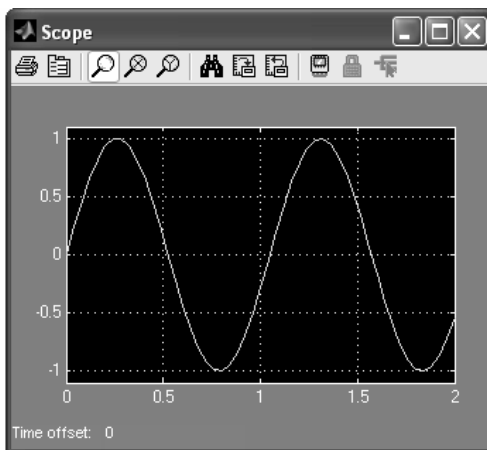
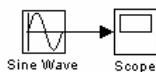
Konstruē pētāmo signālu raksturlīknes, kā laika funkcijas. Ļauj novērot modelēšanas procesa signālu izmaiņu. Raksturlīkņu pārskatu logs ir parādīts 3. attēlā.

Lai atvērtu pārskatu logu, nepieciešams divreiz uzklikšķināt uz bloka piktogrammas ar „peles” kreiso taustiņu. To var izdarīt jebkurā aprēķina etapā. Gadījumā, ja bloka ieejā pienāk vektora signāls, tad katra vektora elementa raksturlīkne tiek atspoguļota ar atsevišķu krāsu. Oscilogrāfa parametru regulēšana ir realizēta ar instrumentu paneļa palīdzību (4. att).

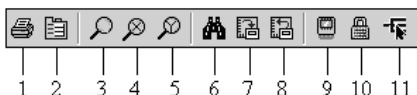
Instrumentu panelim ir 11 elementi:

1. *Print* – izdrukāt oscilogrāfa logu.
2. *Parameters* – atvērt parametru iestatīšanas logu.
3. *Zoom* – abu ass mērogu palielinājums (2.5x).
4. *Zoom X-axis* – horizontālās ass mēroga palielinājums (2.5x).
5. *Zoom Y-axis* – vertikālās ass mēroga palielinājums (2.5x).
6. *Autoscale* – abu asu automātiska mēroga iestatīšana.
7. *Save current axes settings* – esošā loga mēroga saglabāšana.
8. *Restor saved axes settings* – saglabātā loga mēroga iestatīšana.
9. *Floating scope* – oscilogrāfa pārvešana „brīvajā” režīmā.

10. *Lock/Unlock axes selection* – aizvērt/atvērt saiti starp esošā loga koordinātu sistēmu un atspoguļoto signālu. Instruments pieejams, ja ir ieslēgts režīms *Floating scope*.
11. *Signal selection* – atspoguļoto signālu izvēle. Instruments pieejams, ja ir ieslēgts režīms *Floating scope*.

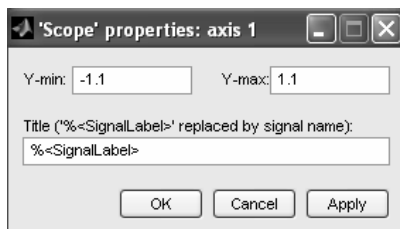


3. att. Bloka *Scope* pārskatu logs




4. att. Bloka *Scope* instrumentu panelis

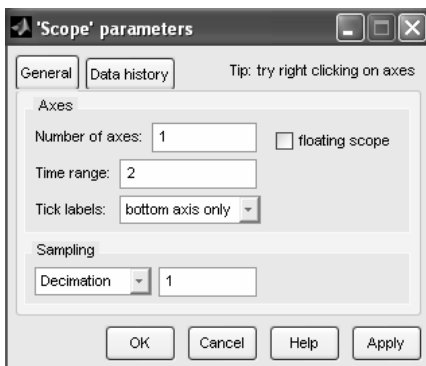
Uzklīkšķinot ar labo „peles” taustiņu uz raksturliķnes loga un izvēloties komandu *Axes properties*, atver logu, kurā ar parametru *Y-min* un *Y-max* var norādīt ass robežvērtības. Šajā logā var norādīt arī raksturliķnes nosaukumu (*Title*), aizvietojot izteiksmi *<SignalLabel>* ievadu rindā. Raksturliķņu īpašību logs ir parādīts 5. attēlā.



5. att. Bloka *Scope* raksturliķņu īpašību logs

Bloka parametri tiek uzstādīti logā *Scope parameters*, kurš tiek atvērts ar instrumenta paneļa  (*Parameters*) elementa palīdzību. Parametru logam ir divi ieliktņi:

- *General* – vispārējie parametri.
 - *Data history* – MATLAB darba vidē signālu saglabāšanas parametri.
- Parametru logs ir parādīts 6. att.



6. att. Bloka *Scope* parametru logs (General)

Ar ieliktna *General* palīdzību tiek uzstādīti sekojoši parametri:

Number of axes – oscilogrāfa ieeju skaits (koordinātu sistēma). Izmainot šo parametru, blokam parādās papildu ieejas porti.

Time range – atspoguļotās raksturlieknes mainīgā intervāla vērtība. Ja aprēķina laiks uzstādīts lielāks par parametru *Time range*, tad raksturlieknes izvads būs sadalīts posmos, posmu garumi būs vienādi ar *Time Range* parametra vērtību.

Tick labels – ass un ass iezīmju izvads/noslēpšana. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *all* – iezīmes katrai asij,
- *none* – ass un ass iezīmes netiek parādītas,
- *bottom axis only* – horizontālās ass iezīmes tikai apakšējai raksturlieknei.

Floating scope – ja atzīmēts, tad oscilogrāfs darbojas „brīvajā” režīmā.

Sampling – raksturliekņu izvada loga parametru iestatīšana. 7. att. ir parādīta sinusoidāla signāla raksturliekne, kas ir aprēķināta ar fiksēto soli 0.1 s (parametrs *Decimation* ir vienāds ar 2).

Godījumā, ja izvada režīms ir uzdots kā *Sample time*, tad to skaitlisko vērtību nosaka kvantēšanas intervāls signāla atspoguļošanas laikā. 8. att. ir parādīta sinusoidāla signāla raksturliekne (*Sample time* ir vienāds ar 0.1).

Ar ieliktna *Data history* palīdzību tiek uzstādīti sekojoši parametri:

Limit data points to last_ – maksimālais atspoguļoto aprēķina punktu skaits. Ja uzrādīta vērtība tiek pārsniegta, tad raksturlieknes sākumdaļa tiek nogriezta. Ja parametrs nav atzīmēts, tad

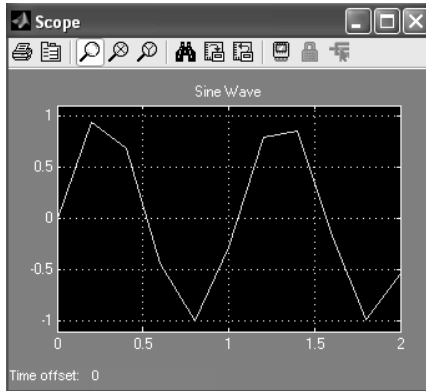
Simulink automātiski palielina to vērtību, lai atspoguļot visus aprēķina punktus.

Save data to workspace_ – signālu vērtību saglabāšana MATLAB darba vidē.

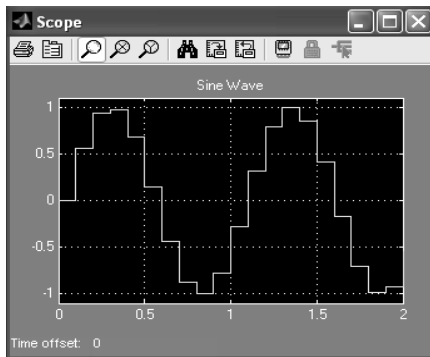
Variable name_ – MATLAB darba vidē saglabātā signāla mainīgā nosaukums.

Format – MATLAB darba vidē saglabātā signāla datu formāts. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

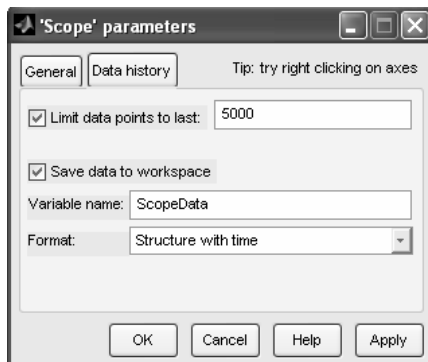
- *Array* – masīvs,
- *Structure* – struktūra,
- *Structure with time* – struktūra ar papildu lauku „laiks”(9. att.)



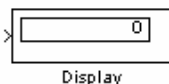
7. att. Sinusoidāla signāla raksturlikne (*Decimation = 2*)



8. att. Sinusoidāla signāla raksturlikne (*Sample time = 0.1*)

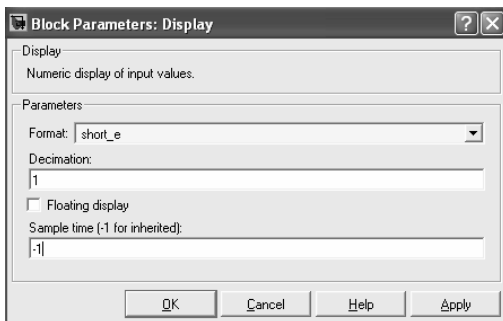


9. att. Bloka Scope parametru logs (*Data history*)

Piktogramma:**Uzdevums:**

Atspoguļot signāla skaitlisko vērtību.

Parametru logs (10. att.):



10. att. Bloka parametru *Display* logs

Bloka parametri:

Format – datu atspoguļošanas formāts. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

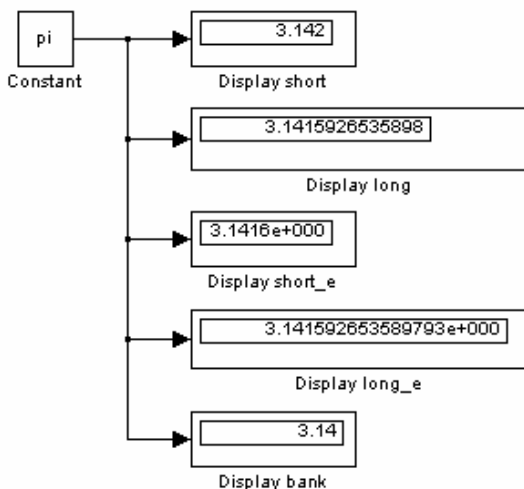
- *short* – atspoguļo 5-ciparu skaitļi ar fiksētu decimālo punktu,
- *long* – atspoguļo 15-ciparu skaitļi ar fiksētu decimālo punktu,
- *short_e* – atspoguļo 5-ciparu skaitļi ar „brīvu” decimālo punktu,
- *long_e* – atspoguļo 16-ciparu skaitļi ar „brīvu” decimālo punktu,
- *bank* – atspoguļo skaitļi, kā naudas vērtība,

Decimation – izejas signāla atspoguļošanas kārtība, ja *Decimation* = 1 tiek atspoguļota katra izejas signāla vērtība, ja *Decimation* = 2 tiek atspoguļota katra otrā izejas signāla vērtība utt.

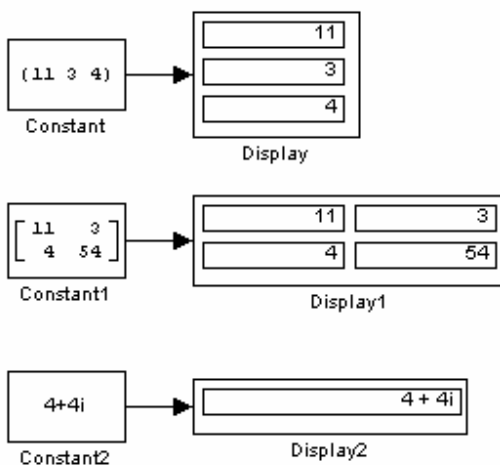
Sample time – modeļa laika solis, atspoguļo izejas datu diskretību.

Floating display – ja atzīmēts, bloks strādā „brīvajā” režīmā, šajā režīmā izejas ports neeksistē, atspoguļotā signāla izvēle tiek izpildīta uzklīkšķinot ar „peles” kreiso taustiņu uz attiecīgās līnijas, aprēķina parametram *Signal storage reuse* vajag būt izslēgtā stāvoklī *off* (ieliktnis *Advanced* dialogu logā *Simulation parameters*) (11. att.).

Bloks *Display* var but izmantots ne tikai skalāro signālu atspoguļošanai, bet arī vektora, matricas un komplekss signāliem (12. att.).



11. att. Bloka *Display* izmantošana ar dažādam parametra *Format* vērtībām

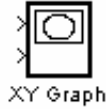


12. att. Bloka *Display* izmantošana vektora, matricas un kompleks signālu atspoguļošanai

XY Graph

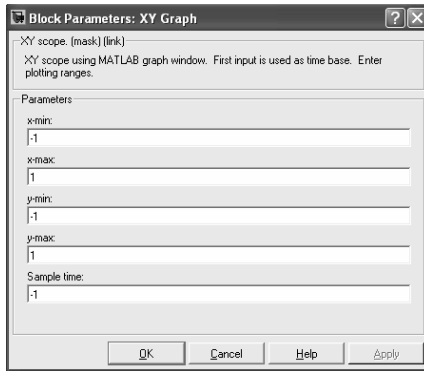
XY raksturliķņu veidotājs

Piktogramma:



Uzdevums:

Konstruēt viena signāla raksturlīkni otra signāla funkcijā (funkcija $Y(X)$).
 Parametru logs (13. att.):



13. att. Parametru bloka *XY Graph* logs

Bloka parametri:

$x-min$ – x ass signāla minimālā vērtība,

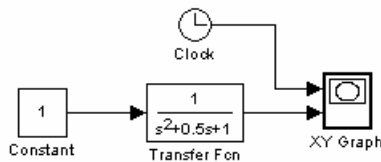
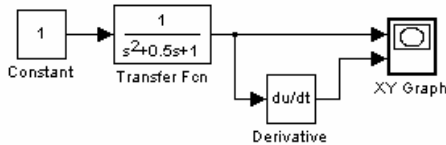
$x-max$ – x ass signāla maksimālā vērtība,

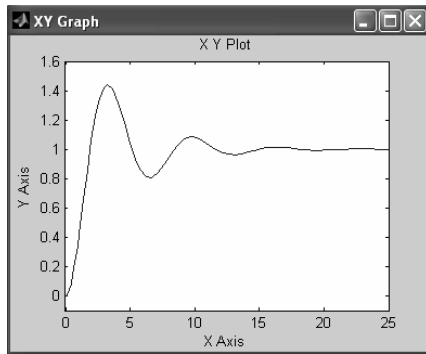
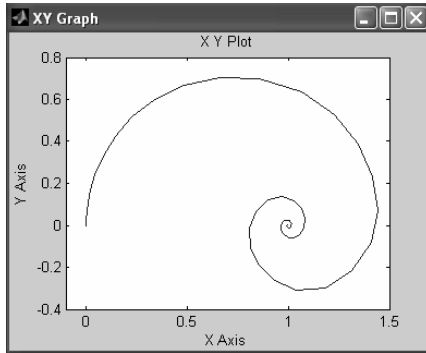
$y-min$ – y ass signāla minimālā vērtība,

$y-max$ – y ass signāla maksimālā vērtība,

Sample time – modeļa laika solis, atspoguļo izejas datu diskretību.

Blokam ir divas ieejas. Augšējā ieeja paredzēta X argumenta signālam, apakšējā ieeja ir paredzēta Y funkcijas signālam. Bloka izmantošanas piemēri ir parādīti zemāk (14. att.).





14. att. Bloka *XY Graph* izmantošanas piemēri: svārstības posma fāzu trajektorija (augšā), funkcijas izmaiņa laikā (apakšā)

Mux	Multipleksors
------------	----------------------

Piktogramma:



Uzdevums: Apvienot ieejas signālus vektorā.

Parametru logs (15. att.):

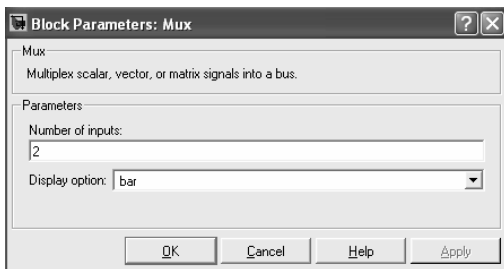
Bloka parametri:

Number of inputs – ieeju skaits.

Display option – bloka atspoguļošanas metode. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *bar* – vertikāls šaurs melns taisnstūris,

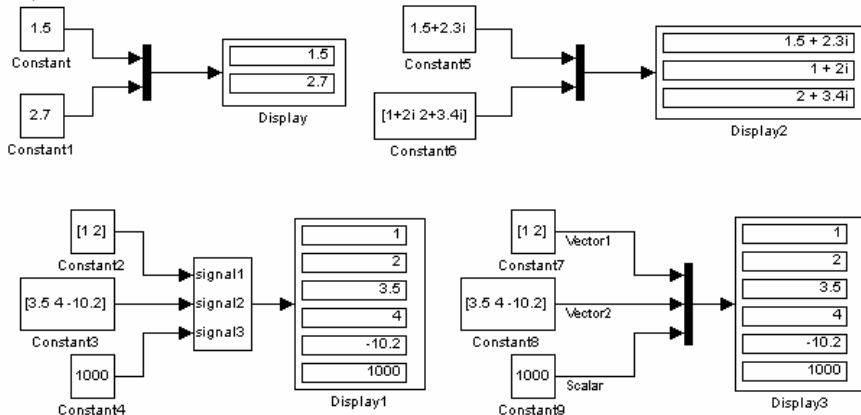
- *signals* – balts taisnstūris ar ieejas signālu apzīmējumiem,
- *none* – balts taisnstūris ar bloka nosaukumu.



15. att. Parametru bloka *Mux* logs

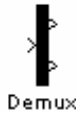
Ieejas signāli var būt skalāri un/vai vektora formā. Ja starp ieejas signāliem ir vektori, tad ieeju skaitu var uzdot kā vektoru ar katra ieejas vektora elementu skaitu. Piemēram, izteiksme $[2, 3, 1]$ nosaka trīs ieejas signālus, pirmais signāls – vektors, kas sastāv no diviem elementiem, otrs – vektors no trim elementiem, pēdējais signāls – skalārs. Gadījumā, ja ieejas vektora elementu skaits nesakrīt ar norādīto parametērā *Number of inputs*, tad aprēķina sakumā *Simulink* parādīs kļūdas ziņojumu.

Vektora elementu skaitu var uzdot kā $[-1]$. Šajā gadījumā elementu skaitu noteiks programma. Parametru *Number of inputs* arī var uzdot kā signālu nosaukumu sarakstu, piemēram: *Vector1*, *Vector2*, *Scalar*. Šajā gadījumā signālu nosaukumi būs parādīti blakus atbilstošām savienojošām līnijām. Uz bloka ieeju padotajiem signāliem jābūt viena tipa (reāliem vai kompleksiem skaitļiem). Bloka *Mux* izmantošanas piemēri ir parādīti zemāk (16. att.):



16. att. Bloka *Mux* izmantošanas piemēri

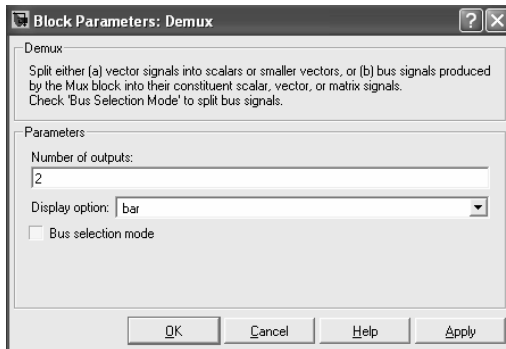
Piktogramma:



Uzdevums:

Sadalīt ieejas vektora signālu atsevišķos elementos.

Parametru logs (17. att.):



17. att. Parametru bloka *Demux* logs

Bloka parametri:

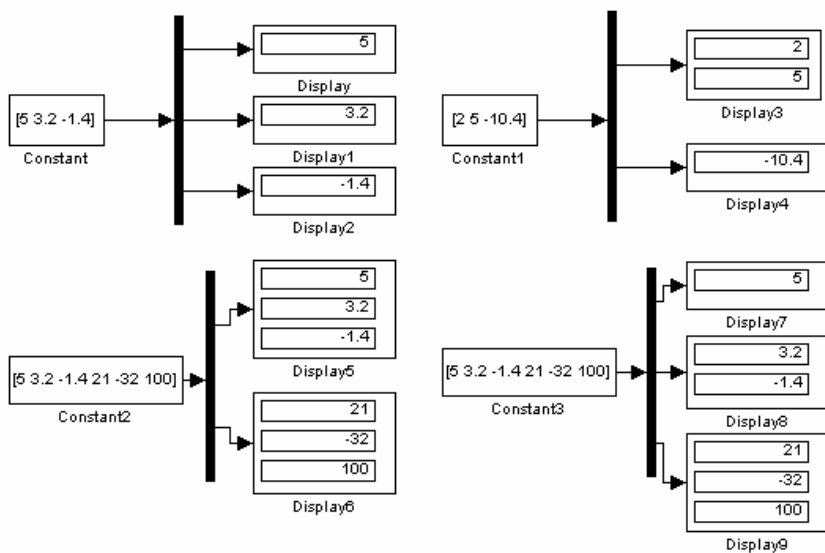
Number of outputs – izeju skaits.

Display option – bloka atspoguļošanas metode. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

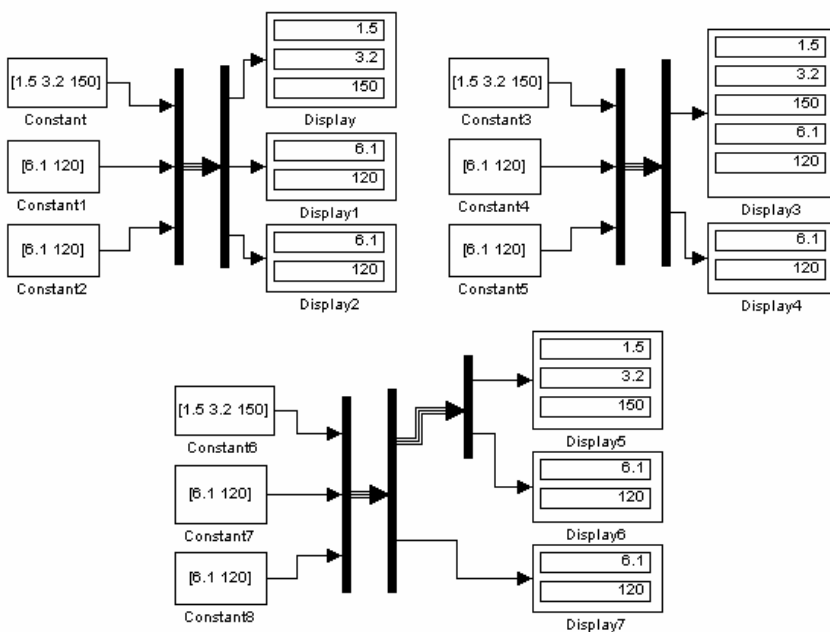
- *bar* – vertikāls šaurs melns taisnstūris,
- *none* – balts taisnstūris ar bloka nosaukumu.

Ieejas signāls parastā režīmā ir vektors, formēts jebkurā veidā. Izejas signāli ir skalārā vai vektorālā formā, to skaitu un elementu skaitu nosaka parametrs *Number of outputs*, kā arī izejas vektora elementu skaits. Ja izeju skaits P (*Number of outputs* parametra vērtība) ir vienāds ar izejas signāla N elementu skaitu, tad bloks sadala ieejas vektoru atsevišķos elementos. Ja izeju skaits P ir mazāks par izejas signāla N elementu skaitu, tad pirmo $P-1$ izejas signālu elementu skaits ir vienāds ar attiecību N/P , noapaļotu līdz tuvākajam skaitlim, bet pēdēja signāla elementu skaits ir vienāds ar ieejas signāla elementu un pirmo $P-1$ izeju elementu summas starpību. Parametrs *Number of outputs* var būt uzdots kā vektors, kas nosaka katra izejas signāla elementu skaitu. Piemēram, izteiksme $[2\ 3\ 1]$ nosaka trīs izejas signālus, pirmais – vektors, kas sastāv no diviem elementiem, otrais – vektors no trim elementiem, pēdējais signāls – skalārs. Elementu skaitu var arī uzdot kā $[-1]$.

Bus selection mode režīmā bloks *Demux* strādā nevis ar atsevišķiem vektora elementiem, bet ar vektoriem. Ieejas signālam jābūt formētam ar bloku *Mux* vai citu *Demux* bloku. Parametrs *Number of inputs* šajā gadījumā tiek uzdots kā skalārs lielums vai vektors.



18. att. Bloka *Demux* izmantošanas piemēri



19. att. Bloka *Demux* režīma *Bus selection mode* izmantošanas piemērs

8. Integrēšanas metodes izvēle

Modeļa aprēķināšanas laikā, lietotājam pastāv iespēja izvēlēties integrēšanas metodi – nepārtrauktu vai diskretu, ar mainīgu vai fiksētu soli. Neliela izmēra sistēmām nepārtrauktas metodes aprēķins ar mainīgu soli parasti dod lielāku precizitāti. Algoritms ar mainīgu soli ir arī ātrāks, jo soļu skaits ir mazāks nekā aprēķinam ar fiksētu soli pie vienādas precizitātes. Enerģētiskās elektronikas ierīču aprēķinos metodēm ar mainīgu soli ir arī lielāka precizitāte, jo nosaka pusvadītāju iekārtu strāvas nulles stāvokļu pāreju tā, ka netiek novēroti signālu pārrāvumi.

Tomēr lielām sistēmām (sistēmas ar lielu stāvokļa mainīgo un nelineāro bloku skaitu) augsta nepārtrauktas metodes precizitāte noved pie aprēķina aizkavēšanās. Šajā gadījumā liela sistēma (nosacīti) tiek pieņemta par sistēmu, kura satur vairāk par 30 stāvokļu mainīgo un vairāk par 6 atslēgām. Šajos gadījumos ir izdevīgi veikt sistēmas diskretizāciju.

Lielākā daļa no *Simulink* esošajām aprēķinu metodēm ar mainīgu soli dod labus rezultātus lineāro sistēmu aprēķinos. Tomēr, sistēmām ar nelineāriem elementiem ir nepieciešamas nelineāro sistēmu aprēķinu metodes. Vislielāko nelineāro sistēmu aprēķina ātrumu panāk, izmantojot metodes *ode23tb* vai *ode15s* ar noklusēti uzdotiem parametriem:

- *Solver* (metode): *ode23tb* vai *ode15s*,
- *Relative tolerance* (relatīvā kļūda) = $1e-3$,
- *Absolute tolerance* (absolūtā kļūda) = *auto*,
- *Maximum step size* (maksimālais solis) = *auto*,
- *Minimum step size* (minimālais solis) = *auto*,
- *Initial step size* (sākotnējais solis) = *auto*,
- *Maximum order* (maksimālā kārtā, *ode15s*) = 5.

Parasti absolūtai kļūdai un maksimālajam soļa izmēram var izvēlēties *auto* vērtību. Tomēr var gadīties, ka tos vajadzēs ierobežot. Izvēloties maksimālo soļa garumu, vajag sekot sekojošām rekomendācijām:

- solis nedrīkst pārsniegt 0.1 no minimālās sistēmas laika konstantes vērtības,
- ja sistēmā ir mainīga sprieguma vai strāvas avoti, solis nedrīkst pārsniegt 0.01 – 0.02 avota ar lielāko frekvenci frekvences vērtības.

Absolūtās kļūdas izvēle ir atkarīga no paredzētajam signālu maksimālajām vērtībām. Rekomendējama attiecība ir 0.01 – 0.001 no signāla maksimālās vērtības.

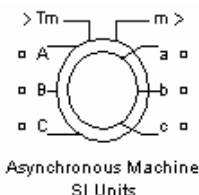
9. Elektropiedziņas asinhronā dzinēja modelēšana

9.1. Izmantoto bloku apraksts

Asynchronous Machine

Asinhrona mašīna

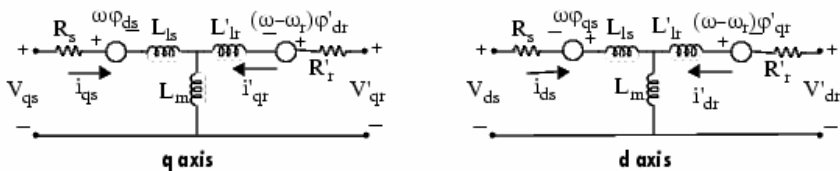
Piktogramma:



Uzdevums:

Modelēt asinhronu elektrisko mašīnu dzinēja vai ģeneratora režīmos. Darba režīms tiek apzīmēts ar mašīnas elektromagnētiskā momenta zīmi: pozitīvu vai negatīvu.

Modelēšanas porti A , B un C ir mašīnas statora tinumu izvadi, bet porti a , b un c – mašīnas rotora tinumu izvadi. Ports Tm ir paredzēts kustības pretošanās momenta padevei. Izvada portā m formējas vektoru signāls, kas sastāv no 21 elementa: strāvas, rotora un statora spriegumi un plūsmas nekustīgā un rotējošā koordinātu sistēmā, elektromagnētiskais moments, vārpstas rotēšanas ātrums, kā arī vārpstas stāvokļa leņķis. Lai būtu ērtāk dabūt mašīnas mainīgās vērtības *SimPowerSystems* bibliotēkā it paredzēts *MachinesMeasurement Demux* bloks. Asinhronās mašīnas modelis iekļauj sevī mašīnas elektriskās daļas modeli, kas izveidots kā telpas ceturrtās kārtas stāvokļu sistēma un mehāniskās daļas modelis otras kārtas sistēmas veidā. Visi mašīnas elektriskie parametri un mainīgie piesaisīti statoram. Mašīnas elektriskās daļas sākuma vienādojumi ir uzrakstīti divtāžu (dq -ass) koordinātu sistēmai. 20. attēlā ir parādīta mašīnas aizvietošanas shēma un tās vienādojumi.



20. att. Asinhronās mašīnas aizvietošanas shēma

9.2. Elektriskās mašīnās matemātisko modeļu vienādojumi

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} & \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} & \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} & \varphi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} & \varphi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\
 T_e &= 1.5(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) & L_s &= L_{ls} + L_m, L'_r = L'_{lr} + L_m
 \end{aligned}$$

Elektriskās mašīnas matemātiskā modeļa vienādojumu indeksiem ir sekojošs apzīmējums:

- d – mainīgā projekcija uz d ass,
- q – mainīgā projekcija uz q ass,
- r – rotora mainīgais vai parametrs,
- s – statora mainīgais vai parametrs,
- l – noplūdes induktivitāte,
- m – magnetizācijas ķēdes induktivitāte.

Elektriskās mašīnas mehāniskā daļa tiek aprakstīta ar diviem vienādojumiem:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m$$

Elektriskās mašīnas matemātiskā modeļa vienādojumu sistēmā iekļautajiem mainīgajiem ir sekojošs apzīmējums:

R_s, L_{ls} - statora pretestība un noplūdes induktivitāte,

R'_r, L'_{lr} - rotora pretestība un noplūdes induktivitāte,

L_m - magnetizācijas ķēdes induktivitāte,

L_s, L'_r - statora un rotora pilnās induktivitātes,

V_{qs}, i_{qs} - statora strāvas un sprieguma projekcijas uz **q** ass,

V'_{qr}, i'_{qr} - rotora strāvas un sprieguma projekcijas uz **q** ass,

V_{ds}, i_{ds} - statora strāvas un sprieguma projekcijas uz **d** ass,

V'_{dr}, i'_{dr} - rotora strāvas un sprieguma projekcijas uz **d** ass,

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ - statora plūsmu sasaistīšanas projekcijas uz **d** un **q** ass,

$\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$ - rotora plūsmu sasaistīšanas projekcijas uz **d** un **q** ass,

ω_m - rotora leņķiskais ātrums,

θ_m - rotora leņķiskais stāvoklis,

p - polu pāru skaits.

Atbilstošs parametru logs parādīts 21. attēlā.

Bloka parametri:

Rotor type: [Rotora tips]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Squirrel-Cage* – īsi slēgts rotors <vāveres rats>,
- *Wound* – fāžu rotors.

Reference frame: [Koordinātu sistēma]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Rotor* – nekustīga relatīvi rotoram,
- *Stationary* – nekustīga relatīvi statoram,
- *Synchronous* – rotējoša kopa ar lauku.

Nom. power, L-L volt. and frequency [$P_n(VA), U_n(V), f_n(Hz)$]:

[Nomināla jauda $P_n(W)$, nominālais līnispriegums $U_n(V)$ un nomināla frekvence $f_n(Hz)$].

Stator [$R_s(Ohm) Lls(H)$]:

[Statora pretestība $R_s(\Omega)$ un noplūdes induktivitāte $Lls(H)$].

Rotor [$Rr(Ohm) Llr'(H)$]:

[Rotora pretestība $Rr(\Omega)$ un noplūdes induktivitāte $Llr'(H)$].

Mutual inductance $Lm(H)$:

[Savstarpēja induktivitāte $Lm(H)$].

Inertia, friction factor and pairs of poles [$J(kg \cdot m^2) F(N \cdot m \cdot s) p$]:

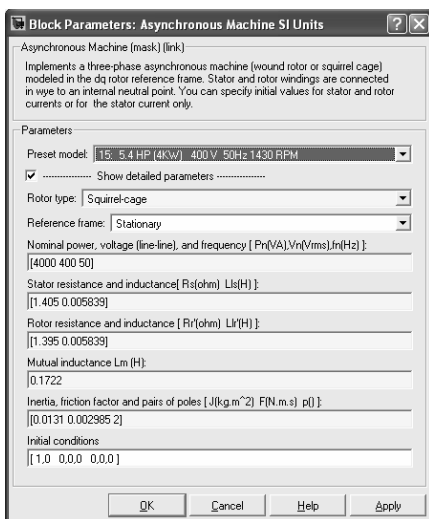
[Inerces moments $J(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$, berzes koeficients $F(N\cdot\text{m}\cdot\text{s})$ un polu pāru skaits p].

Initial conditions [s $th(\text{deg})$ $isa, isb, isc(A)$ $phA, phB, phC(\text{deg})$]:

[Palaišanas apstākļi]. Parametrs tiek uzdots kā vektors, tā elementi ir sekojoša nozīme:

- s – slīde,
- th – fāze (grad.),
- isa, isb, isc – statora strāvu sākumvērtības (A),
- phA, phB, phC – statora strāvu fāžu sākumvērtības (grad.).

Mašīnas palaišanas apstākļus var izrēķināt ar bloka *Powergui* palīdzību (īsi slēgtam rotoram).



21. att. Elektropiedziņas asinhronas mašīnas bloka *Asinhronous Machine SI Units* parametru logs

Mašīnas parametru aprēķiniem tiek izmantoti sekojoši izejas dati:

- | | |
|---|---|
| P_n - nomināla jauda [W], | $\cos \varphi$ - jaudas koeficients [$n.v.$], |
| U_n - nominālais līnijas spriegums [V], | I_n - statora nomināla strāva [A], |
| f_1 - tīkla frekvence [Hz], | k_I - palaišanas strāvas kārtņība, |
| [$n.v.$], | |
| n_n - vārpsta griešanās nominālais ātrums [$apgr/min$], | J - inerces moments [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$], |
| m_p - palaišanas momenta kārtņība [$n.v.$], | η - lietderības koeficients [$n.v.$], |
| m_{\max} - maksimālā momenta kārtņība [$n.v.$], | p - polu pāru skaits. |

Asinhronas mašīnas parametrus var aprēķināt pēc sekojošiem izteiksmēm:

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \text{ - nominālais fāzes spriegums } [V],$$

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} - \text{magnētiskā lauka rotēšanas ātrums (sinhronais ātrums) [apgr/min],}$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} - \text{nominālā slīde [n.v.],}$$

$$s_{kr} = s_n (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) - \text{kritiskā slīde [n.v.],}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} - \text{magnētiskā lauka rotēšanas ātrums (sinhronais ātrums) [rad/s],}$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} - \text{nominālais leņķiskais vārpstas griešanas ātrums [rad/s],}$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} - \text{nominālais moments [N·m],}$$

$$M_{\max} = m_{\max} M_n - \text{maksimālais moments [N·m],}$$

$$M_p = m_p M_n - \text{palaišanas moments [N·m],}$$

$$P_{meh} = (0.01 \div 0.05) P_n - \text{mehāniskie zudumi [W],}$$

$C = (1.01 \div 1.05)$ - pielīdzināšanas koeficients (mazāka vērtība mašīnām ar lielāku jaudu),

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{P_n + P_{meh}}{I_n^2 \frac{1 - s_n}{s_n}} - \text{rotora pielīdzinātā aktīvā pretestība [\Omega],}$$

$$R_s = \frac{U \cos \varphi (1 - \eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{meh}}{3 I_n^2} - \text{statora aktīvā pretestība [\Omega],}$$

$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi \cdot f_1 (1 + C^2) k_l I_n}$ - statora un rotora pielīdzinātā noplūdes induktivitāte [H],

$$L_s = \frac{U}{2\pi \cdot f_1 I_n \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} - \frac{2}{3} \frac{2\pi \cdot f_1 M_{\max}}{pU} \frac{s_n}{s_{kr}}} - \text{statora induktivitāte [H],}$$

$$L_m = L_s - L_{sp} - \text{magnētiskas ķēdes induktivitāte [H].}$$

Pielīdzināšanas koeficienta noteikšana tiek realizēta pēc parametru aprēķināšanas, izmantojot sekojošu formulu:

$$C1 = 1 + \frac{L}{L_m} \frac{sp}{m}$$

Koeficientu CI jāsalīdzina ar iepriekš pieņemto C . Pēc vajadzības aprēķinu var atkārtot, cenšoties panākt minimālo starpību starp C un CI .

10. Elektropiedziņas trīsfāzu asinhronā dzinēja parametru modelēšanas un aprēķina piemērs

function aprēķins (**Pn, Un, f, nn, n, cosfi, In, ki, mp, mmax, p**)

Uf=Un/1.73; n1=60*f/p; sn=(n1-nn)/n1; sk=(mmax+sqrt(mmax^2-1))*sn;

w1=(2*pi*f)/p; wn=pi*nn/30; Mn=Pn/wn;

for c=1:0.01:1.05;

Rr=(1.015*Pn)/(3*In^2*((1-sn)/sn));

Rs=((Uf*cosfi*(1-n))/In)-(Rr*c^2)-(0.015*Pn/(3*In^2));

Lsp=Uf/(2*w1*(1+c^2)*ki*In);

Ls=Uf/w1*In*sqrt(1-cosfi^2)-(2*w1*mmax*Mn*sn)/(3*Uf*sk*p);

Lm=Ls-Lsp;

c1=1+Lsp/Lm;

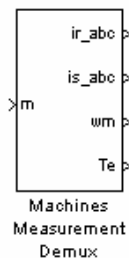
[Rr Rs Lsp Lm c c1]

end

Machines Measurement Demux

Elektriskas mašīnas mainīgo mērījumu bloks

Piktogramma:



Uzdevums:

Bloks ir paredzēts elektriskas mašīnas to mainīgo lielumu iegūšanai no izejas vektora, kuri raksturo to stāvokli. Bloks darbojas kopā ar sinhrono un asinhrono dzinēju modeļiem.

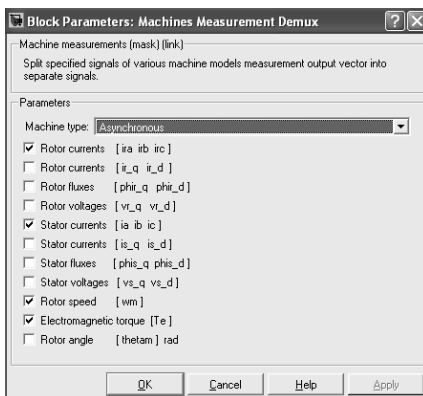
Parametru logs (22. att.):

Bloka parametri:

Machine type: [Mašīnas tips] Tiek izvēlēts no saraksta:

- *Simplified synchronous* – vienkāršota sinhrona mašīna,
- *Synchronous* – sinhrona mašīna,

- *Asynchronous* – asinhrona mašīna,
- *Permanent magnet synchronous* – sinhrona mašīna ar pastāvīgiem magnētiem.



22. att. Parametru bloka *Machines Measurement Demux* logs

Atkarībā no izvēlētās mašīnas tipa parametru logā būs attēlots dažāds mašīnas mainīgo parametru sakopojums. Zemāk ir apskatīts asinhronās mašīnas mainīgo pieejamais saraksts. Asinhronā mašīna:

Rotor currents [ira ib ic] – rotora tīnumu strāvas,

Rotor currents [ir_q ir_d] – rotora strāvu projekcijas uz q un d ass,

Rotor fluxes [phir_q phir_d] – rotora plūsmu projekcijas uz q un d ass,

Rotor voltages [vr_q vr_d] – rotora spriegumu projekcijas uz q un d ass,

Stator currents [ia ib ic] A – statora tīnumu strāvas,

Stator currents [is_q is_d] A – statora strāvu projekcijas uz q un d ass,

Stator fluxes [phis_q phis_d] – statora plūsmu projekcijas uz q un d ass,

Stator voltages [vs_q vs_d] V – statora spriegumu projekcijas uz q un d ass,

Rotor speed [wm] rad/s – rotora rotēšanas ātrums,

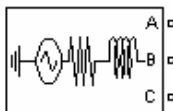
Electromagnetic torque [Te] N.m – elektromagnētiskais moments,

Rotor angle [thetam] rad – rotora leņķiskais stāvoklis.

Three-Phase Source

Trīsfāzu sprieguma avots

Piktogramma:



Three-Phase Source

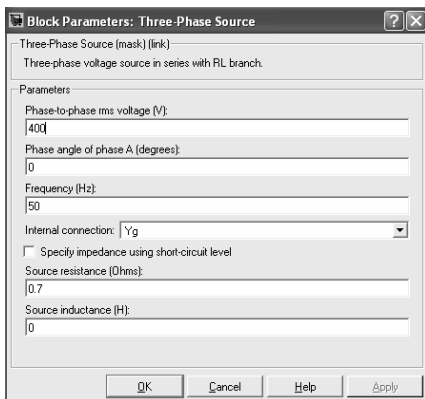
Uzdevums:

Izveidot trīsfāzu sprieguma sistēmu.

Atbilstošais parametru logs atspoguļots 23. attēlā.

Bloka parametri:

Phase-to-phase rms voltage (V): [Līnijas sprieguma iedarbes vērtība].
Phase angle of phase A (deg): [Sprieguma sākuma fāze A fāzē (grad)].
Frequency (Hz): [Frekvence (Hz)]. Avota frekvence.



23. att. Parametru bloka *Three –Phase Source* logs

Internal connection: [Avota fāžu savienojums]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- Y – zvaigzne,
- Yn – zvaigzne ar nulles izvadu,
- Yg – zvaigzne ar sazēmēto neitrāli.

Specify impedance using short-circuit level: [Uzdot pilno avota pretestību, izmantojot īssavienojuma parametrus]. Ja tiek atzīmēts, logā parādās papilddailes avota īssavienojuma parametru ieviešanai.

Source resistance (Ohms): [Avota pretestība (Ω)].

Source inductance (H): [Avota induktivitāte (H)].

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA): [Trīsfāžu īssavienojuma jauda pie bāzes sprieguma vērtības].

Base voltage ($V_{rms\ ph-ph}$): [Bāzes spriegums]. Avota bāzes līnijas sprieguma vērtība, pie kuras tiek aprēķināta īssavienojuma jauda.

X/R ratio: [Induktīvas un aktīvas pretestības attiecība]. Uzdotot avota impedanci izmantojot īssavienojuma jaudu, reaktīvā pretestība tiek aprēķināta pēc formulas:

$$X = \frac{U_{\alpha}^2}{Q_{\alpha}}$$

kur:

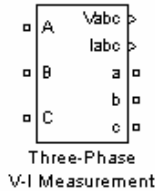
Q_{α} - īssavienojuma jauda,

U_{α} - avota spriegums, pie kura tiek aprēķināta īssavienojuma jauda.

Savukārt reaktīvā pretestība tiek aprēķināta pēc formulas:

$$R = \frac{X}{k}$$

kur k - X un R attiecība (parametrs *X/R ratio*).

Piktogramma:**Uzdevums:**

Veikt trīsfāžu ķēžu spriegumu un strāvu mērīšanu.

Atbilstošais parametru logs parādīts 24. attēlā.

Bloka parametri:

Voltage Measurement: [Spriegumu mērīšana]. Šajā ailē ir izvēlēts mērītājs spriegums:

- *no* – spriegums netiek mērīts,
- *phase-to-ground* – fāžu sprieguma mērīšana,
- *phase-to-phase* – līnijas sprieguma mērīšana.

Use a label: [Izmantot iezīmi]. Ja tiek apzīmēts, signāls ies uz bloku *From*. Bloka *From* parametram *Go to tag* jāatbilst iezīmes nosaukumam, kas ir uzdots ailē *Signal label*.

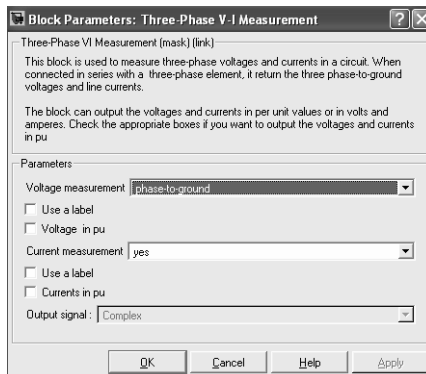
Signal label: [Signāla iezīme].

Voltages in p.u.: [Sprieguma mērīšana nosacītās vienībās].

Ja apzīmēts, izmērītie spriegumi būs pārveidoti saskaņā ar formulu:

$$U_s = \frac{U}{\frac{U_b}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}$$

kur U_b - bāzes spriegums, uzdots ailē *Base voltage*.



24. att. Parametru bloka *Three-Phase V-I Measurement* logs

Base voltage (Vrms phase-phase): [Bāzes spriegums].

Current measurement: [Strāvas mērīšana]. Šajā ailē ir izvēlētas mērītas strāvas:

- *no* – strāva netiek mērīta,

- *yes* – strāva tiek mērīta.

Use a label: [Izmantot iezīmi]. Ja tiek apzīmēts, signāls ies uz bloku *From*. Bloka *From* parametram *Go to tag* jāatbilst iezīmes nosaukumam, kas ir uzdots ailē *Signal label*.

Signal label: [Signāla iezīme].

Currents in p.u.: [Strāvas mērīšana nosacītās vienībās]. Ja apzīmēts, izmērītās strāvas būs pārveidotas saskaņā ar formulu:

$$I_* = \frac{I}{\frac{P_b \cdot \sqrt{2}}{U_b \cdot \sqrt{3}}}$$

kur P_b - bāzes jauda, uzdots ailē *Base power*.

Base power (VA 3 phase): [Bāzes jauda].

Output signal: [Izejas signāls]. Izejas signāla veids. Parametra izvēle ir iespējama tikai tad, ja ar bloka *Powergui* palīdzību ir uzstādīts maiņstrāvas aprēķina režīms (*Phasor simulation*).

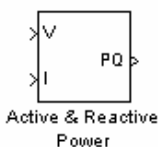
Šajā gadījumā parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Magnitude* – amplitūda (skalārs signāls),
- *Complex* – kompleksais signāls,
- *Real-Imag* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – reālas un imagināras signāla sastāvdaļas,
- *Magnitude-Angle* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – signāla amplitūdas un argumenta.

Bloka izejas signāli ir mērīto mainīgo signālu vektori.

Active & Reactive Power	Aktīvas un reaktīvas jaudas mērītājs
------------------------------------	---

Piktogramma:



Uzdevums:

Izmērīt aktīvo un reaktīvo jaudu periodiskam sprieguma – strāvas pārim, kurš satur harmonikas. P un Q tiek aprēķināti ņemot viena cikla vidējo VI reizināšanas vērtību.

$$P = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (V(\omega t) \cdot I(\omega t)) dt$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (V(\omega t) \cdot I(\omega t - \frac{\pi}{2})) dt$$

kur:

P - aktīvā jauda (W),

Q - reaktīvā jauda (VAR),

T - periods (s),

ω - leņķiskais ātrums (rad/s),

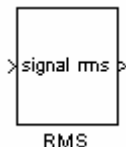
I - strāvas vērtība (A),

V - sprieguma vērtība (V).

Bloka parametri: *Fundamental frequency* (Hz) – fundamentālā frekvence (Hz).

RMS	Vidējās kvadrātiskās kvadrātsaknes mērītājs
------------	--

Piktogramma:



Uzdevums:

Veikt strāvas vai sprieguma ieejošā signāla vidējās kvadrātiskās kvadrātsaknes mērījumus.

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t)^2}$$

kur:

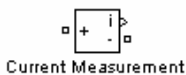
$f(t)$ - ieejas signāls,

T - periods (s).

Bloka parametri: *Fundamental frequency* (Hz) – fundamentālā frekvence (Hz).

Current Measurement	Strāvas mērītājs
----------------------------	-------------------------

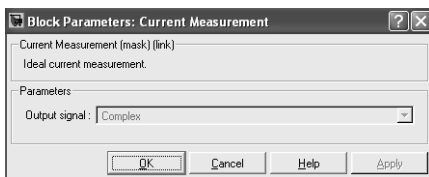
Piktogramma:



Uzdevums:

Atspoguļo strāvas momentāno vērtību, kas plūst caur līniju (vadu). Izejas signāls ir parasts *Simulink* signāls, kuru var izmantot jebkurš cits *Simulink* bloks.

Parametru logs (25. att.):



25. att. Parametru bloka *Current Measurement* logs

Bloka parametri:

Output signal: [Izejas signāls]. Izejas signāla veids. Parametra izvēle ir iespējama tikai tad, ja ar bloka *Powergui* palīdzību ir uzstādīts maiņstrāvas aprēķina režīms (*Phasor simulation*).

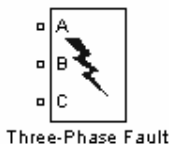
Šajā gadījumā parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Magnitude* – amplitūda (skalārs signāls),
- *Complex* – kompleksais signāls,
- *Real-Imag* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – reālās un imaginārās signāla sastāvdaļas,
- *Magnitude-Angle* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – signāla amplitūdas un argumenta.

Three-Phase Fault

Trīsfāzu īssavienojumu modelētais

Piktogramma:



Uzdevums: Modelēt trīsfāzu iekārtu, kura veido starpfāžu īsslēgumu, kā arī zemes slēgumus. Tā shēma ir parādīta zemāk 27. att. Ja zemes slēgums netiek atzīmēts, pretestībai **R_g** tiek automātiski piešķirta vērtība 10⁶ Ω.

Parametru logs (26. att.) un shēma (27. att.).

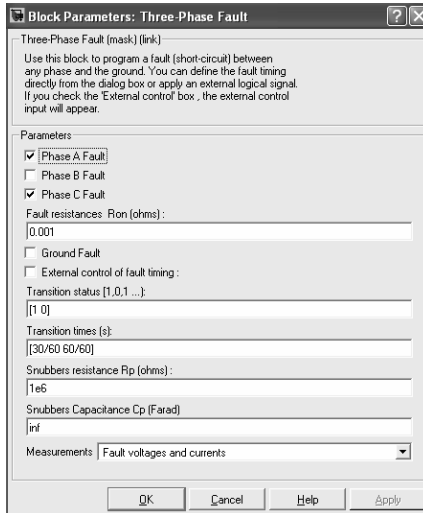
Bloka parametri:

Phase A Fault: [Fāzes A kontakta vadība]. Ja netiek atzīmēts, kontakts paliek izslēgtā stāvoklī. Ja ir atzīmēts, tad programma spriež par kontakta stāvokli, izmantojot parametru *Transition status*, ja bloks darbojas iebūvēta taimera vadībā, vai izmantojot parametru *Initial status of fault*, ja bloks ir vadīts ar ārējo signālu.

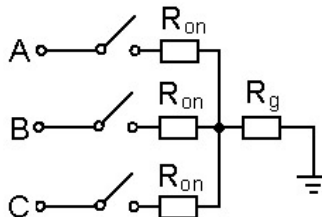
Phase B Fault: [Fāzes B kontakta vadība]. Ja netiek atzīmēts kontakts, paliek izslēgtā stāvoklī. Ja ir atzīmēts, tad programma spriež par kontakta stāvokli, izmantojot parametru *Transition status*, ja bloks darbojas iebūvēta taimera vadībā, vai izmantojot parametru *Initial status of fault*, ja bloks ir vadīts ar ārējo signālu.

Phase C Fault: [Fāzes C kontakta vadība]. Ja netiek atzīmēts, kontakts paliek izslēgtā stāvoklī. Ja ir atzīmēts, tad programma spriež par kontakta stāvokli, izmantojot parametru *Transition status*, ja bloks darbojas iebūvēta taimera vadībā, vai izmantojot parametru *Initial status of fault*, ja bloks ir vadīts ar ārējo signālu.

Fault resistance Ron(Ohm): [Kontaktu pretestība ieslēgtā stāvoklī (Ω)].



26. att. Parametru bloka *Three Phase Fault* logs



27. att. Parametru bloka *Three Phase Fault* shēma

Ground Fault: [Zemes īssavienojums]. Ja atzīmēts, tad tiek modulēts zemes īssavienojums.

Ground resistance $R_g(\Omega)$: [Zemējuma pretestība (Ω)]. Zemējuma pretestība nevar būt vienāda ar nulli.

External control of switching times: [Ārēja ieslēgšanas laika vadība]. Ja atzīmēts, bloka piktogrammā parādās ieejas vadības ports. Vienības signāls izsauc kontaktu saslēgšanu, nulles signāls tos atslēdz.

Transition status [1 0 1...]: [Kontaktu stāvoklis]. Kontaktu stāvoklis attiecīgā laikā, kas tiek uzdots ar vektora *Transition times* palīdzību (0 – atslēgts kontakts, 1 – ieslēgts kontakts). Parametrs ir pieejams, ja process tiek vadīts no iebūvēta taimera.

Transition times (s): [Kontakta ieslēgšanas (atslēgšanas) laiks]. Parametrs tiek uzdots kā laika vērtību vektors, kas nosaka kontaktu ieslēgšanas (atslēgšanas) momentus. Parametrs ir pieejams, ja process tiek vadīts no iebūvēta taimera.

Initial status of fault [Phase A Phase B Phase C]: [Kontaktu sākuma stāvoklis]. Parametrs tiek uzdots kā vektors, kas sastāv no trim elementiem. Tie nosaka kontaktu stāvokli sākuma laikā.

momentā (0 – atslēgts kontakts, 1 – ieslēgts kontakts). Parametrs ir pieejams, ja process tiek vadīts ar ārējo signālu.

Snubbers resistance $R_s(Ohm)$:

[Loka dzesēšanas ķēdes pretestība (Ω)].

Snubbers capacitance $C_s(F)$:

[Loka dzesēšanas ķēdes kapacitāte (F)].

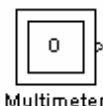
Measurements:

[Mērītie mainīgie]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Fault voltages* – īsslēguma spriegums (uz kontaktiem),
- *Fault currents* – īsslēguma strāvas (uz kontaktiem),
- *Fault voltages and currents* – īsslēguma spriegumi un strāvas (uz kontaktiem).

Multimeter	Universālais mērītājs
-------------------	------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums:

Veikt strāvas stipruma un sprieguma mērīšanu ar bibliotēkas *SimPowerSystem* bloka palīdzību, kurā dialoga logā ir uzstādīts parametrs *Measurements* (mērāmie mainīgie).

Parametru logs parādīts 28. attēlā.

Bloka parametri:

Available Measurements: [Pieejamie mainīgie]. Šajā ailē tiek parādīti bloku, kuriem dialoga logā ir uzstādīts parametrs *Measurements* (mērītie mainīgie), mainīgie. Mainīgo sarakstu var atjaunot izmantojot taustiņu *Update*.

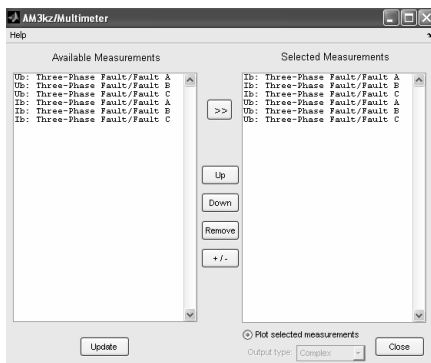
Selected Measurements: [Mērītie mainīgie]. Šajā ailē tiek apzīmēti mainīgie, kas būs padoti uz bloka *Multimeter* izeju. Lai vadītu mērīto mainīgo sarakstu var izmantot sekojošus taustiņus:

- $>>$ – pievienot apzīmēto mainīgo mērīto sarakstā,
- *Up* – pārcelt apzīmēto mainīgo mērīto sarakstā augšup,
- *Down* – pārcelt apzīmēto mainīgo mērīto sarakstā lejup,
- *Remove* – izdzēst apzīmēto mainīgo no mērīto mainīgu saraksta,
- $+/-$ – izmainīt apzīmētā mainīgā zīmi.

Output signal: [Izejas signāls]. Izejas signāla veids. Parametra izvēle ir iespējama tikai tad, ja ar bloka *Powergui* palīdzību ir uzstādīts maiņstrāvas aprēķina režīms (*Phasor simulation*). Šajā gadījumā parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Magnitude* – amplitūda (skalārs signāls),
- *Complex* – kompleksais signāls,
- *Real-Imag* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – reālas un imagināras signāla sastāvdaļas,
- *Magnitude-Angle* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – signāla amplitūdas un argumenta.

Bloku var izmantot sprieguma un strāvas mērījumiem parasto mērītāju *Current Measurement* un *Voltage Measurement* vietā.

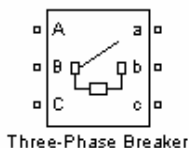


28. att. Parametru bloka *AM3kz/Multimeter* logs

Three-Phase Breaker

Trīsfāzu slēdzis

Piktogramma:



Three-Phase Breaker

Uzdevums:

Modelēt trīsfāžu iekārtu maiņstrāvas pieslēgšanai un atslēgšanai. Sastāv no trim *Breaker* blokiem, vadāmiem ar vienu signālu.

Bloka parametri:

Initial status of breakers: [Kontaktu sākuma stāvoklis]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *open* – visi kontakti atslēgti,
- *closed* – visi kontakti saslēgti.

Switching of phase A: [A fāzes kontakta vadība]. Ja nav atzīmēts, kontakts netiek pārslēgts. Kontakta stāvokli nosaka parametrs *Initial status of breakers*.

Switching of phase B: [B fāzes kontakta vadība]. Ja nav atzīmēts, kontakts netiek pārslēgts. Kontakta stāvokli nosaka parametrs *Initial status of breakers*.

Switching of phase C: [C fāzes kontakta vadība]. Ja nav atzīmēts kontakts netiek pārslēgts. Kontakta stāvokli nosaka parametrs *Initial status of breakers*.

Transition times (s): [Kontakta ieslēgšanas (atslēgšanas) laiks]. Parametrs tiek uzdots kā laika vērtību vektors, kas nosaka kontaktu ieslēgšanas (atslēgšanas) momentus.

Sample time of the internal timer T_s (s): [Iebūvēta taimera diskretizācijas solis].

External control of switching times: [Ieslēgšanas laika ārēja vadība]. Ja atzīmēts, bloka piktogrammā parādās ieejas vadības ports. Vienības signāls izsauc kontaktu saslēgšanu, nulles

signāls tos atslēdz, pie tam, katras fāzes ķēde tiek pārtraukta, ja fāzes strāva sasniedz nulles vērtību.

Breakers resistance: [Kontaktu pretestība ieslēgtā stāvoklī (Ω)].

Snubbers resistance $R_p(Ohm)$: [Loka dzesēšanas ķēdes pretestība (Ω)].

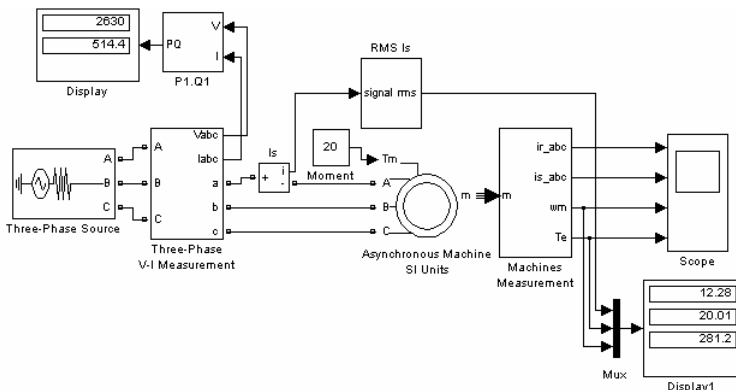
Snubbers capacitance $C_p(F)$: [Loka dzesēšanas ķēdes kapacitāte (F)].

Measurements: [Mērītie mainīgie]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Branch voltage* – spriegums (uz kontaktiem),
- *Branch current* – strāva (uz kontaktiem),
- *Branch voltage and current* – spriegums un strāva (uz kontaktiem).

11. Asinhronā dzinēja darba režīmu modelēšana

Izmantojot MATLAB programmas atbilstošos programmas logus, izveidosim vispārīgo asinhronā dzinēja modeli (29. att.). Asinhronā dzinēja parametri tiek ņemti vai aprēķināti, balstoties uz dzinēja pasē norādītajiem tehniskajiem datiem. Jāaprēķina aizvietošanas shēmas parametri (aktīvās pretestības un induktivitātes). Precīzs aizvietošanas shēmas parametru aprēķins, izmantojot dzinēja tehniskos datus, ir sarežģīts uzdevums, jo tas ir saistīts ar nelineāro elementu aprēķinu. Tāpēc izmantotā metodika nepretendē uz maksimāli iespējamo precizitāti.



29. att. Asinhronā dzinēja darba režīmu modelēšanas shēma

Mašīnas parametru aprēķiniem tiek izmantoti sekojoši izejas dati:

P_n - nomināla jauda [W],

$\cos \varphi$ - jaudas koeficients [$n.v.$],

U_n - nominālais līnijas spriegums [V],

I_n - statora nominālā strāva [A],

f_1 - tīkla frekvence [Hz],

k_I - palaišanas strāvas kārtņība [$n.v.$],

n_n - vārpstas griešanās nominālais ātrums [$apgr/min$],

J - spara moments [$kg \cdot m^2$],

m_p - palaišanas momenta kārtība [n.v.],

η - lietderības koeficients [n.v.],

m_{\max} - maksimālā momenta kārtība [n.v.],

p - polu pāru skaits.

Asinhronās mašīnas parametri tika aprēķināt pēc sekojošiem izteiksmēm:
Nominālais fāzes spriegums [V]:

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

Magnētiskā lauka rotēšanas ātrums (sinhronais ātrums) [apgr/min]:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

Nominālā slīde [n.v.]:

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}$$

Kritiskā slīde [n.v.]:

$$s_{kr} = s_n (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1})$$

Magnētiskā lauka rotēšanas ātrums (sinhronais ātrums) [rad/s]:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$$

Nominālais leņķiskais vārpstas griešanas ātrums [rad/s]:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$$

Nominālais moments [N·m]:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$$

Maksimālais moments [N·m]:

$$M_{\max} = m_{\max} M_n$$

Palaišanas moments [N·m]:

$$M_p = m_p M_n$$

Mehāniskie zudumi [W]:

$$P_{meh} = (0.01 \div 0.05) P_n$$

Pielīdzināšanas koeficients (mazāka vērtība mašīnām ar lielāku jaudu):

$$C = (1.01 \div 1.05)$$

Pielīdzinātā rotora aktīvā pretestība [Ω]:

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{P_n + P_{meh}}{I_n^2 \frac{1 - S_n}{S_n}}$$

Statora aktīvā pretestība [Ω]:

$$R_s = \frac{U \cos \varphi (1 - \eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{meh}}{3 I_n^2}$$

Pielīdzinātā statora un rotora noplūdes induktivitāte [H]:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi \cdot f_1 (1 + C^2) k_I I_n}$$

Statora induktivitāte [H]:

$$L_s = \frac{U}{2\pi \cdot f_1 I_n \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} - \frac{2}{3} \frac{2\pi \cdot f_1 M_{\max}}{pU} \frac{S_n}{S_{kr}}}$$

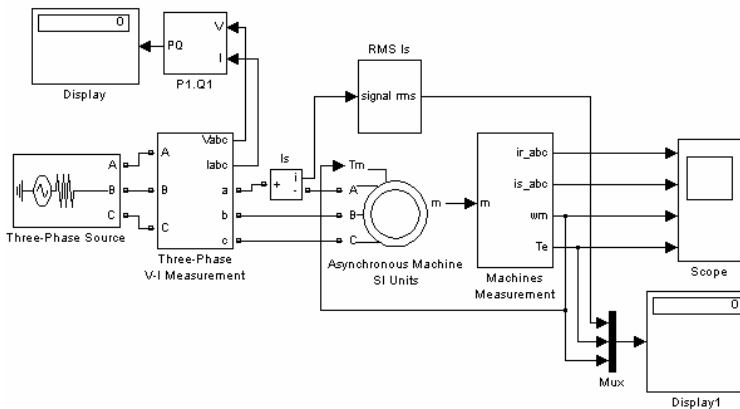
Magnētiskās ķēdes induktivitāte [H]:

$$L_m = L_s - L_{sp}$$

Pielīdzināšanas koeficientu nosaka pēc parametru aprēķināšanas, izmantojot sekojošu formulu:

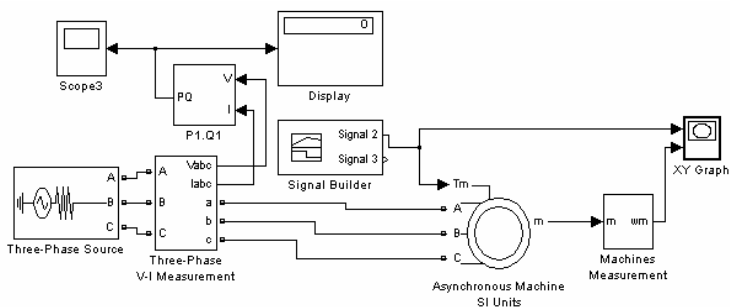
$$CI = 1 + \frac{L_{sp}}{L_m}$$

Koeficientu CI jāsalīdzina ar iepriekš pieņemto C . Pēc vajadzības aprēķinu var atkārtot, cenšoties panākt minimālu starpību starp C un CI [1].



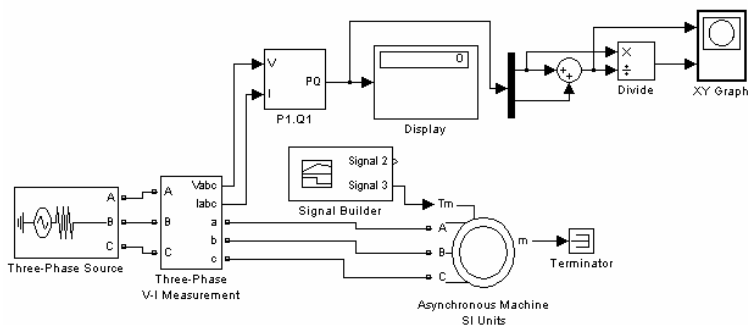
30. att. Asinhrona dzinēja īssavienojuma momenta modelēšanas shēma

12. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlieknes konstruēšana



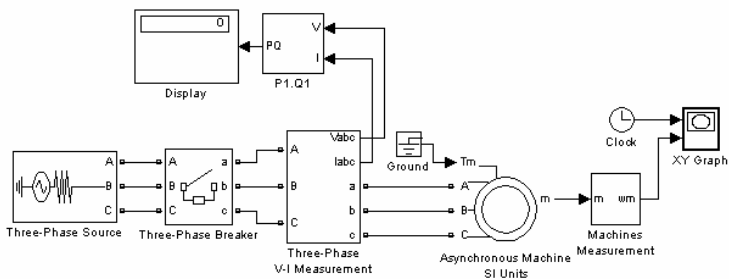
31. att. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlieknes konstruēšanas shēma

13. Asinhronā dzinēja darba raksturliekņu konstruēšana



32. att. Asinhronā dzinēja darba raksturlieknes konstruēšanas shēma

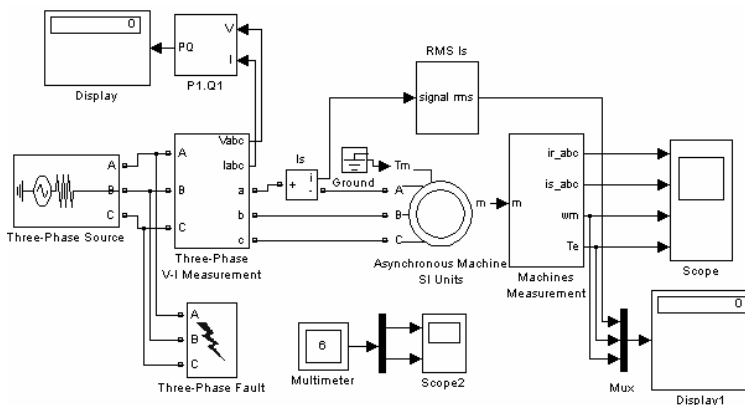
14. Asinhronā dzinēja bremzēšanas raksturlieknes konstruēšana



33. att. Asinhronā dzinēja bremzēšanas raksturlieknes konstruēšanas shēma

15. Asinhronā dzinēja AIP90L2 palaišanas un stacionāra režīmu modelēšana

Tīkla īsslēguma ietekmes modeļu konstruēšanas shēma atspoguļota 34. attēlā. Kā pētīšanas objekts ir izvēlēts asinhronais dzinējs AIP90L2. Sērījas AIP asinhronie dzinēji tiek izmantoti dažādās iekārtās un mašīnās: kompresoros, ventilatoros, automātiskās vadības sistēmās utt. AIP90L2 dzinēja tehniskie dati ir apkopoti 1. tabulā.



34. att. Elektrotīkla īsslēguma ietekmes modeļu konstruēšanas shēma

1. tabula

AIP90L2 tehniskie dati

U_n [V]	f [Hz]	P_n [kW]	n_n [apgr/min]	η [%]	$\cos\varphi$ [n.v.]	I_n [A]	m_p [n.v.]	m_{max} [n.v.]	k_i [n.v.]	p	J [kg·m ²]
380	50	3	2835	84	0.88	6.1	3.0	3.1	6.2	1	0.01

Lai atvieglotu aprēķinu ar programmas MATLAB palīdzību, ir izveidots tā sauktais *m-file* ar nosaukumu *aprekins.m*. Fails satur speciālu funkciju *aprekins*, tajā ir organizēti cikli pēc pielīdzināšanas parametra *C*. Programmas realizācijas interpretācija ir parādīta zemāk:

```
function aprekins(Pn, Un, f, nn, n, cosfi, In, ki, mp, mmax, p)
Uf=Un/1.73; n1=60*f/p; sn=(n1-nn)/n1; sk=(mmax+sqrt(mmax^2-1))*sn;
w1=(2*pi*f)/p; wn=pi*nn/30; Mn=Pn/wn;
for c=1:0.01:1.05;
    Rr=(1.015*Pn)/(3*In^2*((1-sn)/sn));
    Rs=((Uf*cosfi*(1-n))/In)-(Rr*c^2)-(0.015*Pn/(3*In^2));
    Lsp=Uf/(4*pi*f*ki*In*(1+c^2));
    Ls=Uf/((2*pi*f*In)*sqrt(1-cosfi^2)-(2*w1*mmax*Mn*sn)/(3*Uf*sk));
    Lm=Ls-Lsp;
    c1=1+Lsp/Lm;
    [Rr Rs Lsp Lm c c1]
end
```

Ja rodas jautājumi sakara ar faila *aprekins.m* darbību, rekomendē izmantot programmas MATLAB funkciju *help*:

```
>> help aprekins
ievadiet pec kartas:Pn,Un,f,nn,n,cosfi,In,ki,mp,mmax,p
Pn-nominala jauda,Un-nominalais spriegums
f-frekvence,nn-nominalais varpstas griesanas atrums
n-lietderibas koeficients,cosfi-jaudas koeficients
In-nominala strava,ki-palaisanas stravas kartniba
mp-palaisanas momenta kartniba,mmax-maksimala momenta kartniba
p-polu paru skaitu
Rezultati:
Rr-pielidzinata rotora aktiva pretestiba,
Rs-pielidzinata statora aktiva pretestiba,
Lsp-pielidzinata statora(rotora)nopludes induktivitete
Lm-magnetiskas kedes induktivitete
c un c1 pielidzinanas koeficienti
```

Ar faila *aprekins.m* palīdzību iegūtie rezultāti ir apkopoti 2. tabulā:

2. tabula

Ar faila *aprekins.m* palīdzību iegūtie dati (AHP90L2)

R_r [Ω]	R_s [Ω]	L_{sp} [H]	L_m [H]	C	C1
1.5876	3.0793	0.0041	0.2385	1.0000	1.0172
1.5876	3.0474	0.0041	0.2386	1.0100	1.0170
1.5876	3.0152	0.0040	0.2386	1.0200	1.0168
1.5876	2.9826	0.0040	0.2387	1.0300	1.0166
1.5876	2.9498	0.0039	0.2387	1.0400	1.0165
1.5876	2.9166	0.0039	0.2387	1.0500	1.0163

Lai mazinātu aprēķina kļūdu, izvēlas rezultātus ar mazāko C un $C1$ (pieņemtā un faktiskā pielīdzināšanas koeficienta) starpību un ievieto datus asinhronās mašīnas blokā. 35. attēlā ir parādīti ar bloka *Scope* palīdzību iegūtie rezultāti (pie $T_m=15 Nm$).

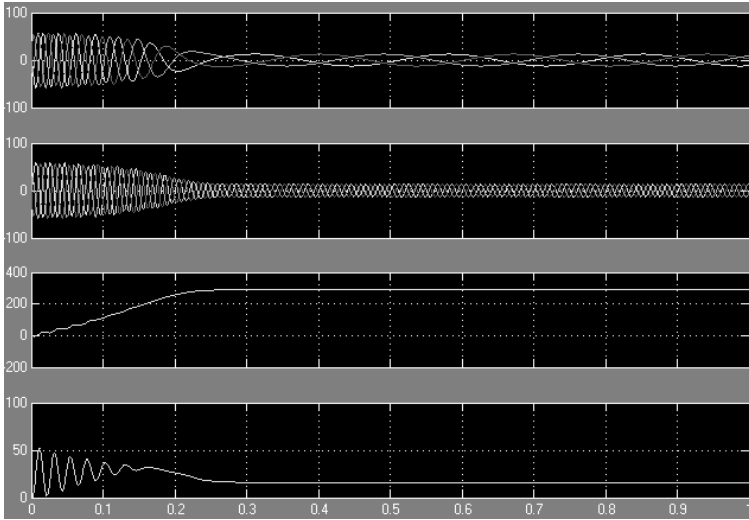
Grafikos atspoguļoti (secībā no augšas uz leju): rotora tinumu strāva (I_r_{abc}), statora tinumu strāva (I_s_{abc}), rotora griešanās leņķiskais ātrums (ω_m), elektromagnētiskais moments (T_e). Tie parāda asinhronā dzinēja AHP90L2 darbību palaišanas un stacionārā režīmā pie nemainīgas slodzes.

No iegūtajiem datiem (3. tab.) var konstruēt situācijas prognozēšanas raksturliķnes.

3. tabula

Eksperimentāli iegūtie rezultāti (A. Bobikins)

T_m [Nm]	T_e [Nm]	ω_m [rad/s]	P [W]	Q [VAR]	I_s [A]	$I_{palaišanas}$ [A]	$t_{palaišanas}$ [s]
0	0.94	313.5	394.2	503.6	2.915	40.80	0.13
5	5.92	307.3	816.3	389.0	4.125	41.07	0.18
10	10.90	299.9	1354.0	392.3	6.443	41.32	0.20
15	15.87	290.9	1998.0	437.6	9.358	41.56	0.26
20	20.83	279.2	2756.0	528.3	12.86	41.77	0.43

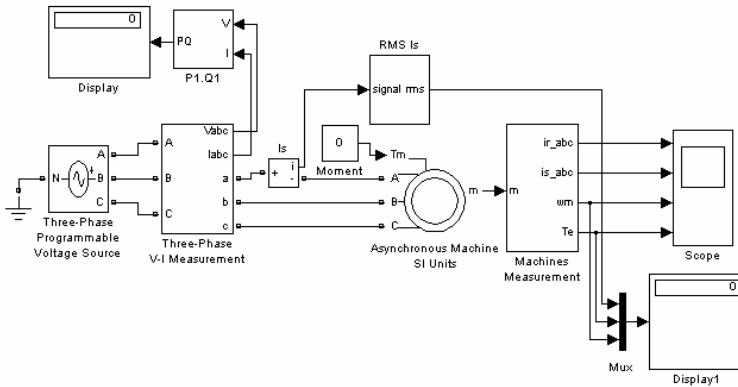


35. att. Asinhronā dzinēja AHP90L2 parametri pie $T_m=15 \text{ Nm}$
 $(I_{r_abc}, I_{s_abc}, w_m, T_e=f(t))$

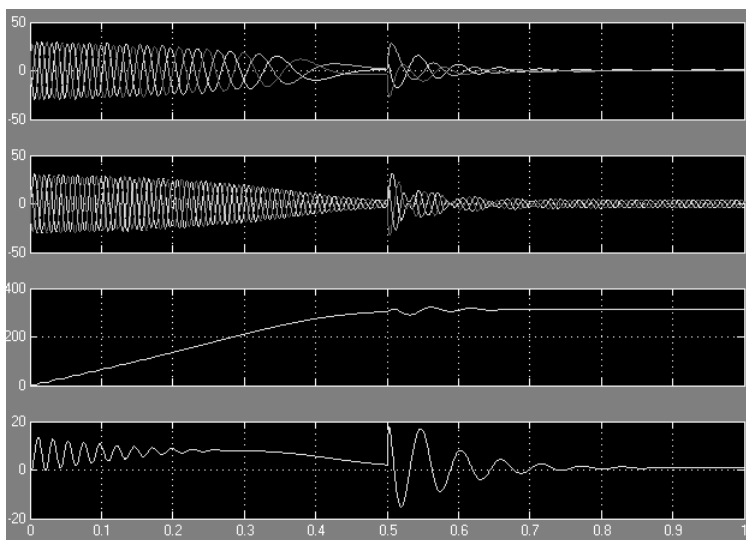
Asinhronā dzinēja virtuālo modeli ir izdevīgi izmantot, pētot elektropiedziņas dzinēja parametru izmaiņu pie dažādiem palaišanas apstākļiem.

15.1. Asinhronā dzinēja AHP90L2 palaišanas strāvas ierobežošana

Palaišanas strāvu ierobežo samazinot palaišanas spriegumu. Izstrādātais modelis ļauj apskatīt asinhronā dzinēja palaišanu ar autotransformatoru (36. att.).



Sprieguma pazemināšana samazina palaišanas strāvas vērtību, tomēr samazinās arī palaišanas moments. Tātad, to nevar izmantot slogotam dzinējam, jo palaišanas moments var būt nepietiekams. Iegūtie rezultāti apkopoti 4. tabulā.



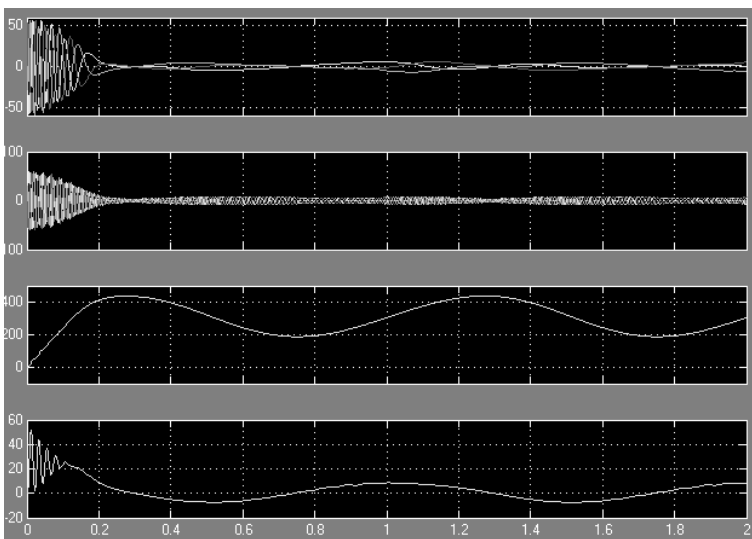
36. att. Asinhronā dzinēja palaišana ar autotransformatoru ($U=190\text{ V}$),
 $(I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e=f(t))$

4. tabula

Eksperimentā iegūtie rezultāti (A. Bobikins)

$U_{\text{palaišanas}}$ [V]	$I_{\text{palaišanas}}$ [A]	$t_{\text{palaišanas}}$ [s]
190	21.17	0.50
247	27.41	0.31
275	31.50	0.23
323	35.54	0.17

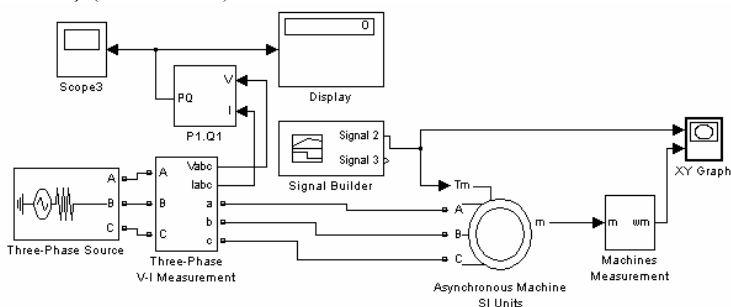
Izstrādātais modelis ļauj apskatīt arī rotora griešanās ātruma regulēšanu, mainot frekvences vērtību (37. att.). Frekvence svārstās 30-70 Hz robežās.



37. att. Rotorā griešanas ātruma regulēšana, mainot frekvenci ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)

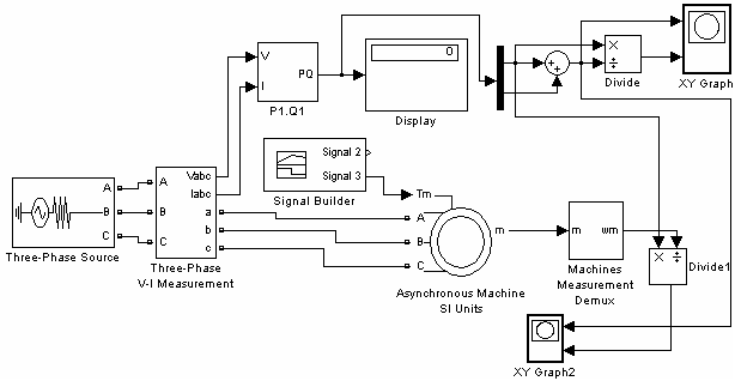
15.2. Asinhronā dzinēja AHP90L2 darba raksturlīkņu veidošana

Lai raksturotu asinhronā dzinēja AHP90L2 darbību pie mainīgam slodzēm, izveidoti sekojoši modeļi (38. un 39. att.):



38. att. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlīknes konstruēšanas modelis ($\omega_m = f(T_m)$)

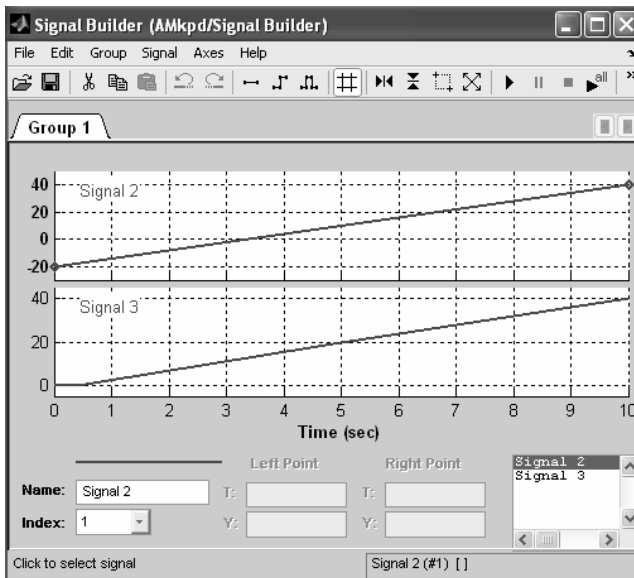
Darba raksturlīknes iegūst eksperimentāli, dzinēju tieši slodzot, kas ne vienmēr ir iespējams, jo nepieciešama speciāla aparatūra un ierīces, atbilstoša barošanas jauda. Tāpēc dzinēju darba raksturlīkņu noteikšanai izmanto riņķa diagrammu, kuru konstruē no tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumu rezultātiem.



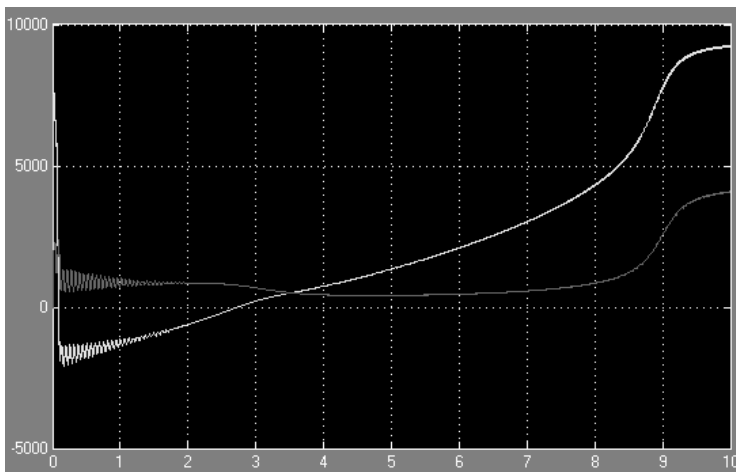
39. att. Asinhronā dzinēja darba raksturliikņu konstruēšanas modelis ($\cos\varphi, M=f(S)$)

Izmantojot izstrādātos modeļus, šo procesu var vienkāršot. Bloks *Signal builder* ļauj virtuāli noslogot dzinēju, vienmērīgi palielinot vārpstas kustības pretestības momentu (T_m). Konstruētās raksturliiknes parādītas 42. attēlā:

- rotora leļķiskā ātruma vērtības atkarība no vārpstas kustības pretestības momenta izmaiņas $wm=f(T_m)$,
- jaudas koeficienta vērtības atkarība no dzinēja patērētās jaudas izmaiņas $\cos\varphi=f(S)$,
- grieznes momenta vērtības atkarība no dzinēja patērētās jaudas izmaiņas $M=f(S)$.

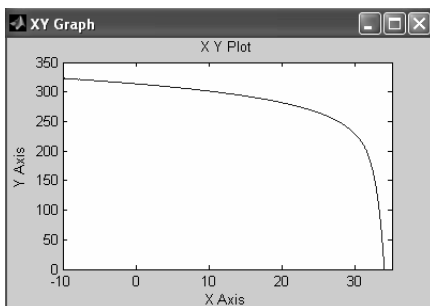


40. att. Vārpstas kustības pretestības momenta (T_m) signāla izmaiņa

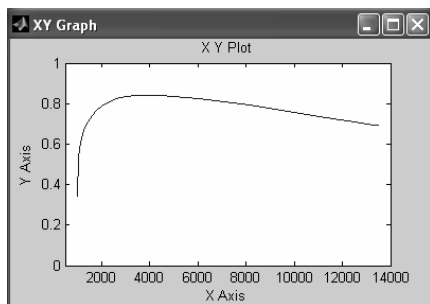


41. att. Aktīvās un reaktīvās enerģijas izmaiņa

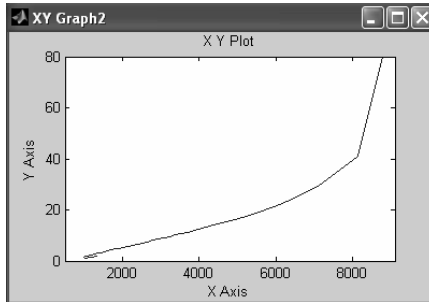
a)



b)



c)



42. att. Raksturliķnes: a) $\omega_m=f(T_m)$ b) $\cos\varphi=f(S)$ c) $M=f(S)$

Jaudas koeficienta ($\cos\varphi$) un griezes momenta (M) vērtībās tiek aprēķinātas pēc sekojošām izteiksmēm:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

$$M = \frac{P}{\omega_m}$$

kur:

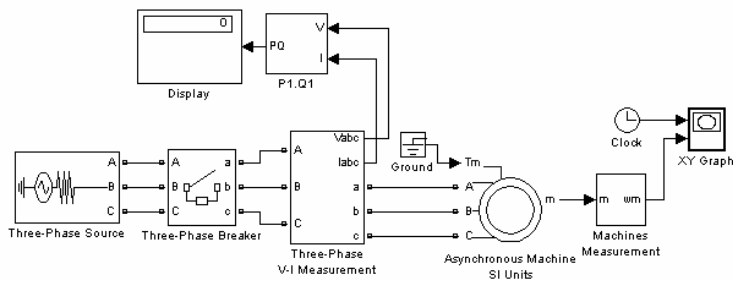
P - aktīvā jauda (W),

S - pilnā jauda (W),

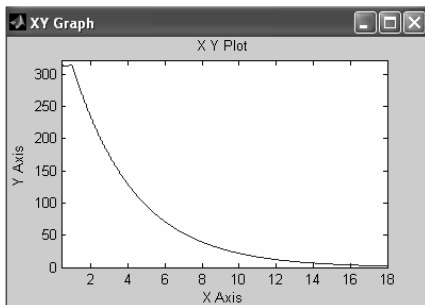
ω_m - rotora leņķiskais ātrums [rad/s].

15.3. Asinhronā dzinēja AIP90L2 bremsēšanas laika modelēšana

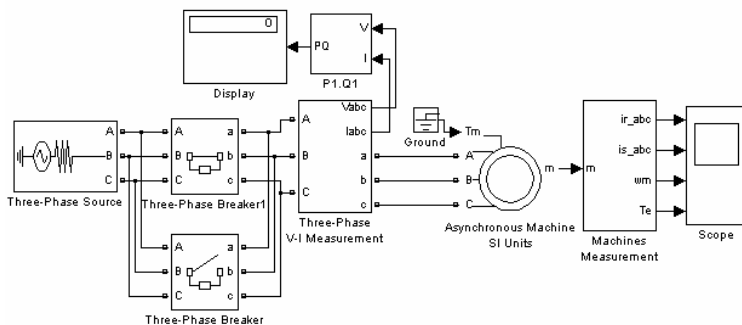
Elektropiedziņas modelēšanā sastopami uzdevumi, kuros ir nepieciešams zināt elektrodzinēja bremsēšanas un izskrejas parametrus. Lai tos noteiktu, ir izveidoti sekojoši modeļi (43., 44. un 45. att.).



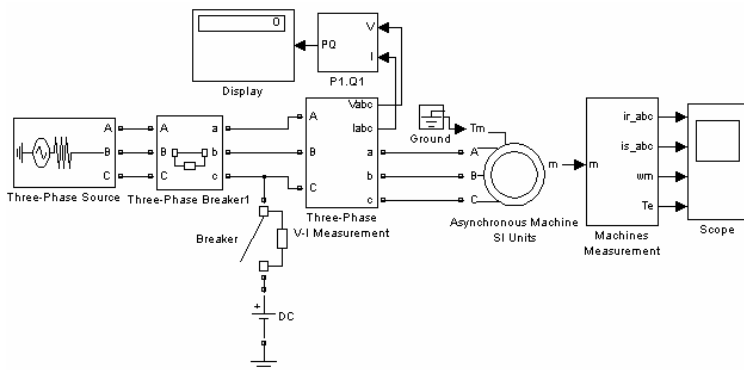
43. att. Asinhronā dzinēja izskrejas raksturliķnes konstruēšanas modelis ($\omega_m=f(t)$)



44. att. Asinhronā dzinēja izskrejas raksturliktne ($w_m=f(t)$)

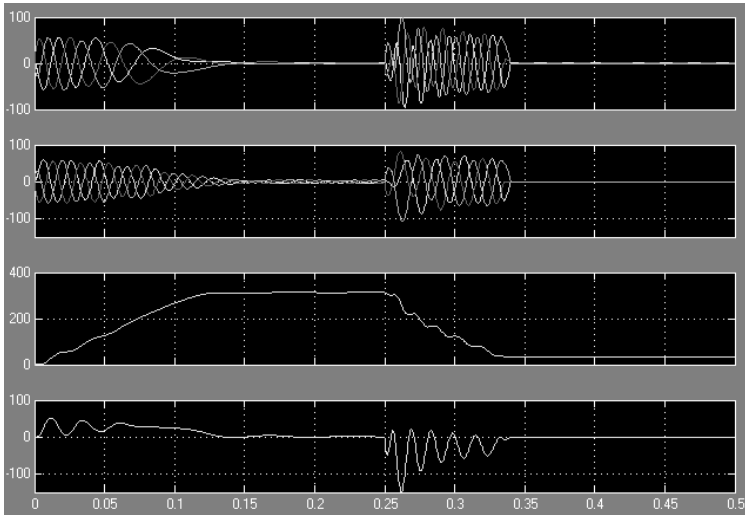


a) bremzēšana, mainot rotora griešanas virzienu

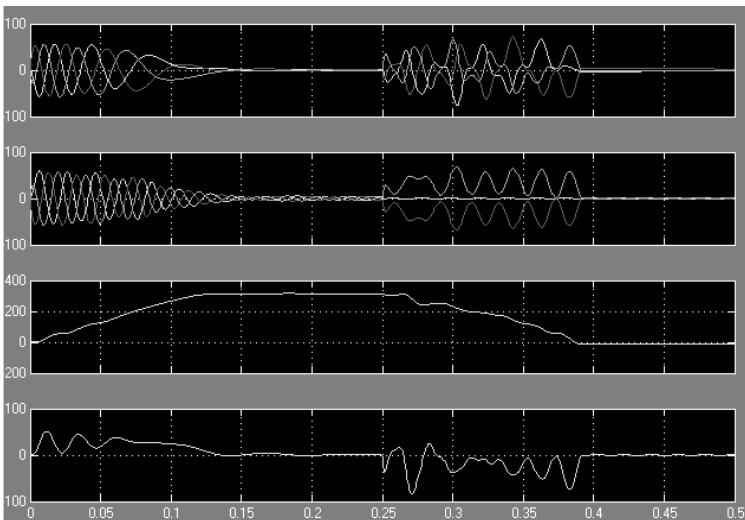


b) bremzēšana ar līdzstrāvu

45. att. Asinhronā dzinēja bremzēšanas modeļi



46. att. Asinhronā dzinēja bremzēšana, mainot rotora griešanas virzienu
($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)



47. att. Asinhronā dzinēja bremzēšana ar līdzstrāvu (*$I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$*)

Aplūkotie modeļi ļauj izpētīt asinhronā dzinēja bremzēšanas laiku pie dažādām slodzēm ar dažādām bremzēšanas metodēm. Modelēšanas rezultāti atspoguļoti 5. tabulā.

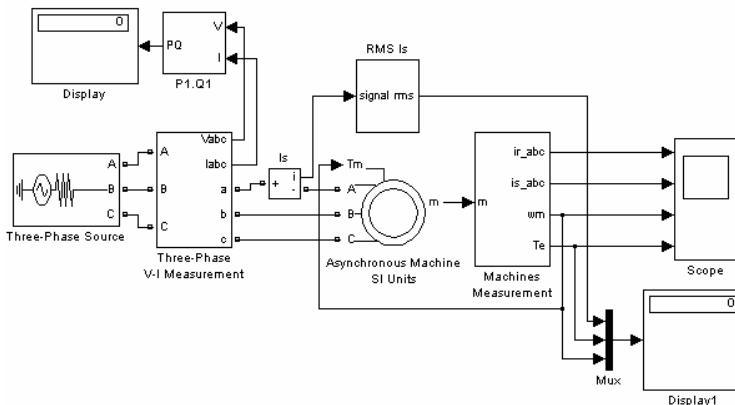
Ekspimentāli iegūtais bremsēšanās laiks (A. Bobikins)

T_m [Nm]	t_{br} [s]		
	izskrēja	mainot griešanas virzienu	ar līdzstrāvu
0	17	0.084	0.137
5	0.56	0.077	0.125
10	0.27	0.074	0.103
15	0.22	0.066	0.091
20	0.12	0.048	0.070

No 5. tabulas datiem var secināt, ka bremsēšana, mainot elektromagnētiskā lauka griešanas virzienu, ir efektīvāka, tomēr bremsēšana ar līdzstrāvu ir laidenāka, kas samazina mehāniskos triecienus.

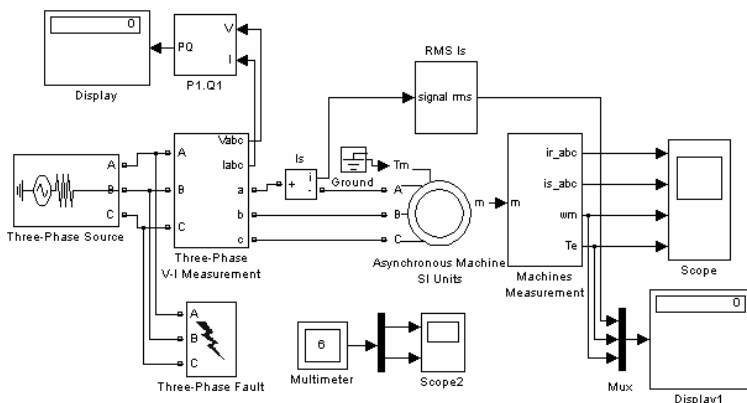
15.4. Īsslēguma ietekmes uz asinchronā dzinēja darbību modelēšana

Lai apskatītu īsslēgumu ietekmi uz asinchronā dzinēja darbību, tika izstrādāti zemāk parādītie modeļi (48. un 49. att.).

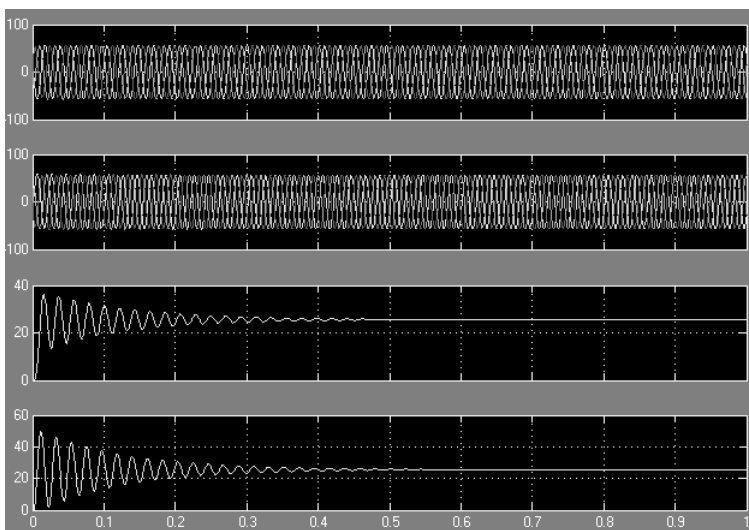


48. att. Starptinumu īssavienojuma momenta modelēšanas struktūrshēma

Modelētās struktūrshēmas ļauj pētīt dažādu veidu īsslēgumu (starpfāžu, starptinumu, zemes slēgumu) ietekmi uz dzinējā notiekošajiem procesiem. Starptinumu īssavienojuma momenta noņemšanai ir izmantots modelis, kurā elektromagnētiskais moments tiek padots uz mašīnas mehānisko ieeju. Īssavienojuma ietekmē statora un rotora tinumos palielinās strāva un pazūd griezes moments, tā ilglaicīga iedarbība noved pie dzinēja sadegšanas.

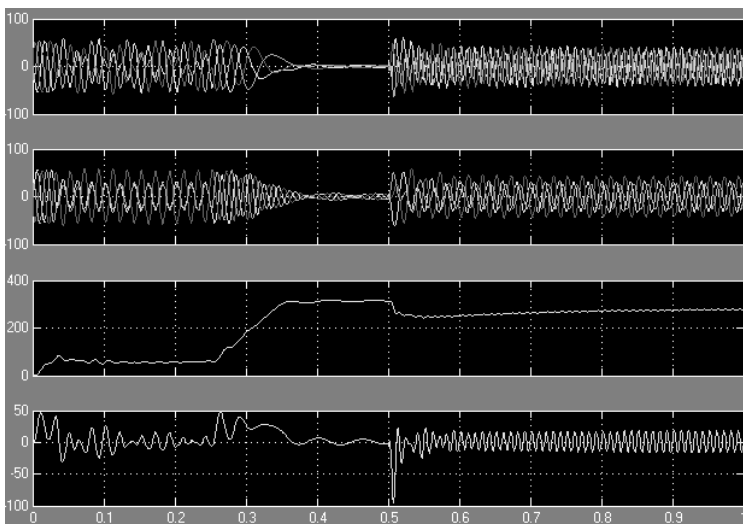


49. att. Elektrotīkla īsslēguma ietekmes uz asinhrona dzinēja darbību modelēšanas struktūrhēma



50. att. Starptīnumu īssavienojuma moments ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, w_m, T_e = f(t)$)

Tīkla īsslēgumu un zemes slēgumu modelēšanai ir izmantots bloks *Three-Phase Fault*. Starptīnāzu īsslēguma gadījumā vienāds līnijas spriegums tiek padots uz dzinēja divām fāzēm, trešajā tas paliek normāls. Amplitūdas nesimetriskums ir maz ievērojams, tomēr fāžu nesimetriskums noved pie pastāvīgas magnētiskā lauka griešanās virziena maiņas, izraisot dzinēja pārkaršanu. MATLAB pielikums *Simulink* atklāj jaunas iespējas elektropiedziņas un elektrisko mašīnu modelēšanā, ļauj imitēt to darbību plašā diapazonā, dažādos režīmos, pie mainīgām slodzēm.



51. att. A un C fāzes savstarpējais īsslēgums ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, w_m, T_e = f(t)$)

16. Noslēgums

Elektropiedziņas virtuālās modelēšanas priekšrocības:

- Grafiskie modeļi, kas tiek veidoti kā algoritmiskās blokskāmas, ļauj viegli mainīt modelējamās sistēmas struktūru, mainīt saites starp blokiem vai iekļaut jaunus blokus un savienot tos ar esošajiem. Pieejams liels skaits standarta bloku, no kuriem var izveidot dažādu elektropiedziņas sistēmu modeļus.
- Blokskāmas uzskatāmi parāda elektropiedziņas sistēmas un to elementu modeļu uzbūvi, kas ļauj padziļināt sapratni par notiekošajiem fizikālajiem procesiem.
- MATLAB aprēķina metodiku var izmantot jebkura elektropiedziņas dzinēja modelēšanai. Pie tam, būtiski samazinās aprēķiniem nepieciešamais laiks un resursi.

Elektropiedziņas virtuālās modelēšanas trūkumi:

- Elektrisko mašīnu siltuma modeļa neesamība samazina MATLAB programmu iespējas elektropiedziņas projektēšanā.
- Liels mainīgo daudzums (it īpaši kompleksie skaitļi) palielina simulācijas procesa kopējo laiku.
- MATLAB grafiskie elementu apzīmējumi neatbilst Latvijā pieņemtajiem, kas var apgrūtināt elektropiedziņas modeļu analīzi.

16.Literatūra

1. Герман-Галкин С.Г. Электрические машины.- Санкт-Петербург, 2003. – 256 с.
2. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink.
3. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем.
4. Ranka G. Elektriskās mašīnas. – Rīga, 1996. – 247 lpp.
5. Zolbergs J. Vispārīgā elektrotehnika. – Rīga, 1974. – 536 lpp.
6. Чен К., Джиблин П. MATLAB в математических исследованиях. – Москва, 2001. – 333 с.
7. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: СОЛЮН-Пресс, 2005. – 576 с.
8. Гултыяев А.К. Матлаб 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. Практическое пособие.- Санкт-Петербург: Корона Принт, 2001. – 400 с.
9. Using Simulink.- The Math Works Inc., 1999. – 605 p.
10. Bobikins A. Elektrisko mašīnu modelēšana MATLAB vidē. Bakalaura darbs prof. G.Moskvina vadībā. LLU, TF, 2006. g., 51 lpp.
11. Okyere, John. Electronics and circuit analysis using MATLAB. – CLC Press, 1999.
12. Haugen, Finn. Modelling and control of dynamic systems. – Skien, Norway: Control Consult, 1997. – 242 p.