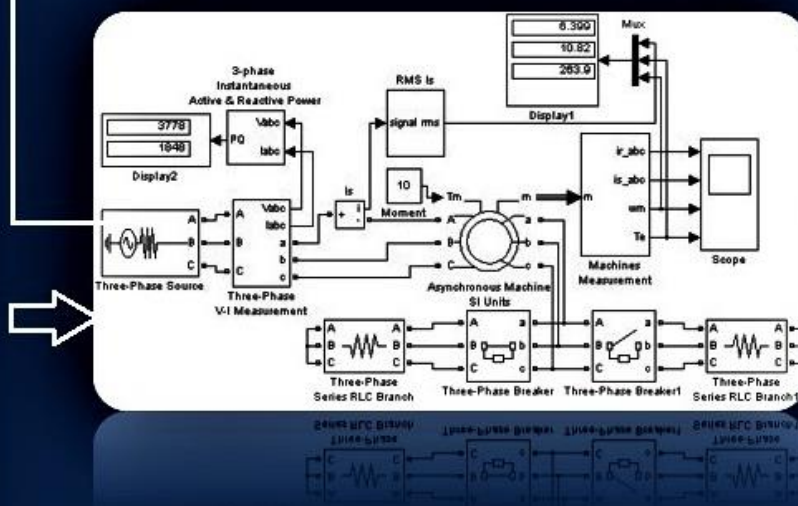


Genādijs MOSKVINS



Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana

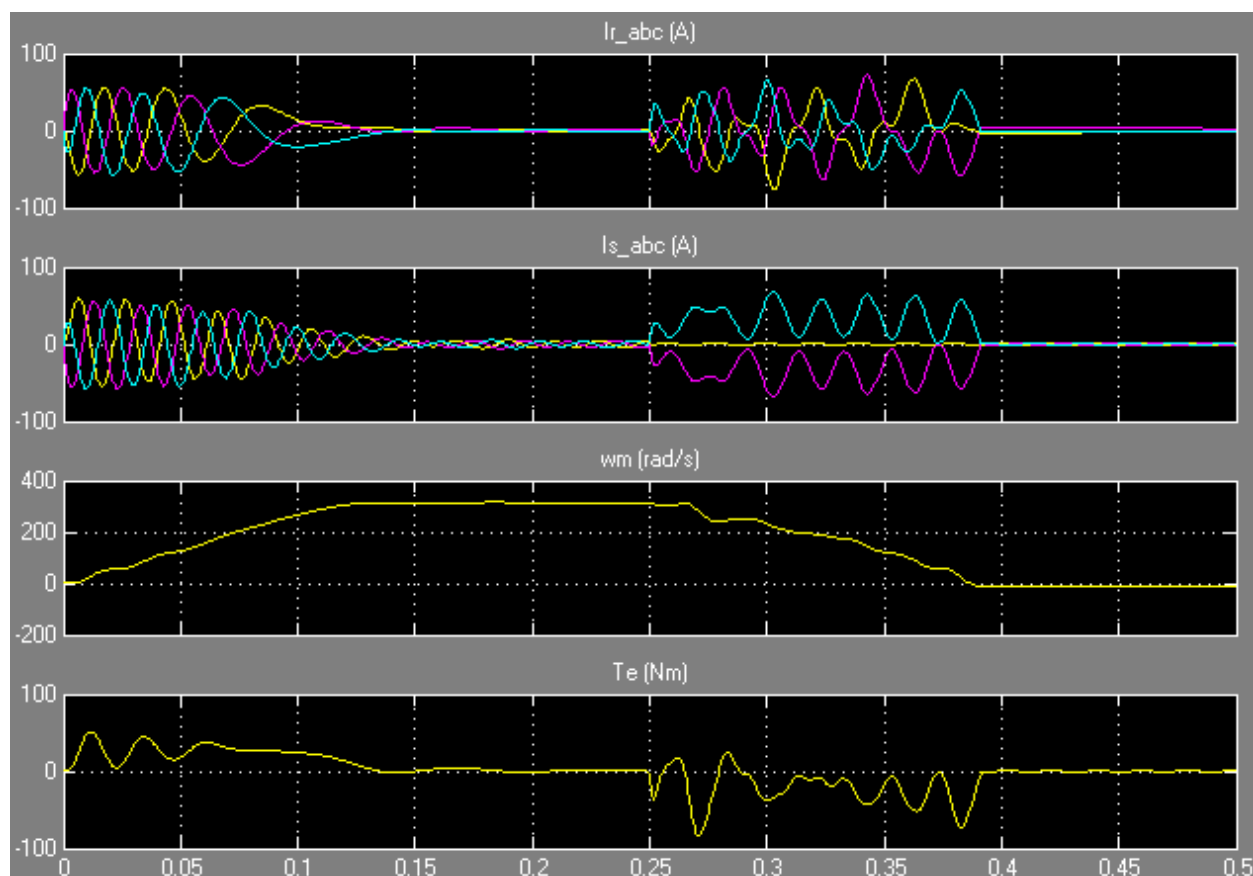


ISBN 978-9984-48-339-9

LLU_Jelgava_2020

Genādijs Moskvins

Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana



LLU_Jelgava_2020

ISBN 978-9984-48-339-9

Moskvins G. „Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana” - ISBN 978-9984-48-339-9 – Jelgava: LLU, 2020. – 96 lpp.

Mācību grāmata „Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana” paredzēta lietišķas enerģētikas bakaluru studiju programmas studentiem, kuri apgūst teorētiskos un praktiskos pamatus mācību priekšmetā „Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa”. Grāmata satur elektropiedziņas un elektrisko mašīnu virtuālas modelēšanas piemērus MATLAB datorprogrammu pielikuma Simulink vidē. Teorētisko jautājumu skaidrojums ir vienkāršs un viegli uztverams, jo tiek saistīts ar praktiskiem piemēriem. Izmantojot MATLAB virtuālās modelēšanas programmas un algoritmus, uzskatāmā formā ilustrējot darba un pārejas režīmu imitāciju plašā diapazonā, grāmata palīdz dziļāk saprast pielietojamo matemātisko modeļu būtību un atbilstošus fizikālos procesus, kas noriet modelējamā elektropiedziņas struktūrā ar atšķirīgiem

tehniskiem un elektriskiem parametriem. Pielietojot tipveida algoritmus, var izveidot, izanalizēt un aprakstīt jebkuru elektropiedziņas darbības modeļi dažādos ekspluatācijas režīmos. Grāmata ir papildināta ar uzdevumiem, kas veicina pašvadītas mācīšanās un elektrisko mašīnu modelēšanas prasmju attīstību.

Recenzents: Dr. prof. E. Spakovica

ISBN 978-9984-48-339-9

© Genādijs Moskvins

Satura radītājs

Ievads	5
1. Modelēšanas procesa analītiskais apskats	8
1.1. Bibliotēkas <i>SimPowerSystems</i> apraksts	6
1.2. Bibliotēkas <i>SimPowerSystems</i> saturs un īpatnības	8
1.3. <i>SimPowerSystems</i> modeļa aprēķināšanas algoritms	10
1.4. Integrēšanas metodes izvēle	12
1.5. Izmantoto Simulink bloku bibliotēka	13
2. Asinhronā dzinēja modelēšana	18
2.1. Modelēšanai izmantoto <i>SimPowerSystems</i> bloku bibliotēka	18
<i>Asynchronous Machine</i>	18
<i>Machines Measurement Demux</i>	20
<i>Three-Phase Source</i>	21
<i>Programmable Three-Phase Source</i>	21
<i>Three-Phase V-I Measurement</i>	22
<i>3-phase Instantaneous Active & Reactive Power</i>	24
<i>Active&Reactive Power</i>	25
<i>Current Measurement</i>	26
<i>RMS</i>	27
<i>Three-Phase Fault</i>	28
<i>Multimeter</i>	30
<i>Three-Phase Breaker</i>	31
<i>Three-Phase Series RLC Branch</i>	33
<i>Three-Phase Series RLC Load</i>	34
2.2. Asinhronā dzinēja strukturāla modeļa izstrāde	36
2.3. Asinhronā dzinēja AIP90L2 palaišanas un stacionāra režīmu pētīšana	39
2.4. Asinhronā dzinēja AIP90L2 palaišanas strāvu ierobežošana	42
2.5. Asinhronā dzinēja AIP90L2 darba raksturliķņu veidošana	44
2.6. Asinhronā dzinēja AIP90L2 bremzēšanas laika pētīšana	48
2.7. Īsslēgumu ietekmes uz asinhronā dzinēja darbību pētīšana	52
2.8. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru palaišanas un stacionāra režīmu pētīšana	56

3. Līdzstrāvas dzinēja modelēšana	59
3.1. Izmantoto <i>SimPowerSystems</i> bloku bibliotēka	59
<i>DC Machine</i>	59
<i>DC voltage source</i>	63
<i>Controlled Voltage Source</i>	66
<i>Series RLC Branch</i>	68
<i>Breaker</i>	73
3.2. Neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja strukturāla modeļa izstrāde	73
3.3. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M palaišanas un stacionāra režīmu pētīšana	75
3.4. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M palaišanas strāvu ierobežošana	77
3.5. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M reversēšana	79
3.6. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M darba raksturlīkņu veidošana	82
3.7. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja darba raksturlīkņu veidošana	85
3.8. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja darba raksturlīkņu veidošana	87
4. Elektrisko mašīnu siltuma režīmu apskats	90
Literatūra	96

Ievads

Efektivitātes jautājums vienmēr ir un būs aktuāls. Elektriskās enerģijas sfērā svarīgākais ir maksimāli samazināt zudumus elektrotīklā, apakšstacijās, sadales punktos un panākt to efektīvāku pielietojšanu. Elektrisko mašīnu virtuāla modelēšana MATLAB vidē svarīga tāpēc, ka liela nozīme ir optimālas elektriskās mašīnas izvēlei konkrēta uzdevuma risināšanai. Šim nolūkam tradicionāli tiek izmantoti tādas metodes, kā matemātiska un fizikāla modelēšana, eksperimenti pārbaudes standos. Matemātiskās modelēšanas aprēķini ir pietiekami precīzi, bet prasa daudz laika un ir zinātnesietilpīgi, ņemot vērā aprakstīto procesu sarežģītību. Lai tos atvieglotu, aprēķini tiek vienkāršoti, un tas samazina to precizitāti. Izmēģinājumi pārbaudes standos atļauj pārbaudīt visus elektriskās mašīnas darba aspektus, tomēr prasa lielus ieguldījumus, kā arī organizēt eksperimentus ar dārgām tehnoloģiskām iekārtām ražošanas apstākļos ir problemātiski un reizēm neiespējami.

Skaitļošanas tehnikas un matemātiskās programmatūras attīstība pēdējos gados ļauj būtiski papildināt elektrisko mašīnu teoriju, pateicoties matemātisko modeļu komplicēšanai un precizēšanai. Tiek piedāvāta jauna modelēšanas metode – virtuālā modelēšana. Virtuālās modelēšanas pamatā ir matemātiskais modelis, uz kura bāzes tiek veidota sistēmas algoritmiska struktūrshēma, kas dod iespēju veikt dažādu sistēmu aprēķinus un to optimizāciju, dinamisko pārejas procesu imitāciju.

Mācību materiāla mērķis ir parādīt elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālās modelēšanas iespējas MATLAB pielikumā *Simulink* vidē, kas veicina prasmju apgūšanu veikt asinhronā elektrodzinēja ar īsi saslēgto rotoru un ar fāzu rotoru modelēšanu, veikt neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas elektrodzinēja modelēšanu un parādīt cita konstruktīva izpildījuma līdzstrāvu elektrodzinēju modelēšanas iespējas, sniegt asinhrona elektrodzinēja siltuma režīmu virtuālas modelēšanas piemēru pie ilgstošas, atkārtoti-īslaicīgas un mainīgas slodzes.

1. Modelēšanas procesa analītiskais apskats

1.1. Bibliotēkas *SimPowerSystems* apraksts

Simulink ir datorprogrammas MATLAB pielikums. Modelējot sistēmas izmantojot *Simulink* tiek realizēts vizuālas programmēšanas princips, saskaņā ar to, lietotājs ar standartu bloku palīdzību veido ierīces modeli un veic aprēķinus. Atšķirība 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.

Bloku bibliotēka *SimPowerSystems* ir viena no *Simulink* papild bibliotēku kopas, kas ir orientēta uz konkrēto sistēmu imitāciju. *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 vadīšanas sistēmu modelēšanu. Izmantojot *Simulink* un *SimPowerSystems* speciālās iespējas, lietotājs varēs ne tikai imitēt iekārtas darbu laikā posmā, bet arī veikt šo iekārtu daudzpusīgu analīzi.

SimPowerSystems neapšaubāma priekšrocība ir tas, ka sarežģītas elektrotehniskas sistēmas var modulēt, apvienojot imitācijas un struktūras modelēšanas metodes. Piemēram, elektriskās enerģijas pusvadītāju pārveidotāja enerģētisko daļu var konstruēt, izmantojot *SimPowerSystems* blokus, bet to vadības sistēmu izmantojot parastus *Simulink* blokus, kuri atspoguļo tikai to darbības algoritmu, nevis tā elektrisko shēmu. Tāda pieeja, atšķirībā no shēmu tehniskās modelēšanas paketēm, ļauj ievērojami samazināt visu modeli, kas vienlaikus nozīmē paaugstināt to darbību un darbības ātrumu. Turklāt modeļos, kuros ir izmantots *SimPowerSystems* (tālāk *SPS-modelis*) 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, izmantojot jau eksistējošos blokus, realizējot *Simulink* apakšsistēmu izveidošanas iespējas, kā arī balstoties uz *Simulink* pamat bibliotēkas blokiem un vadāmiem strāvas vai sprieguma avotiem.

Tādējādi *SimPowerSystems* sastāvā *Simulink* pašlaik var uzskatīt par vienu no visslabākiem elektrotehnisko iekārtu un sistēmu modelēšanas paketi, [1,4,6,8].

1.2. Bibliotēkas saturs un pamatīpatnības

Bibliotēkai *SimPowerSystems* ir sešas pamat nodaļas:

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

Izmantojot šo nodaļu blokus, lietotājs ir spējīgs īsā laikā izveidot pietiekami sarežģītas elektrotehniskās sistēmas pilnvērtīgu modeli.

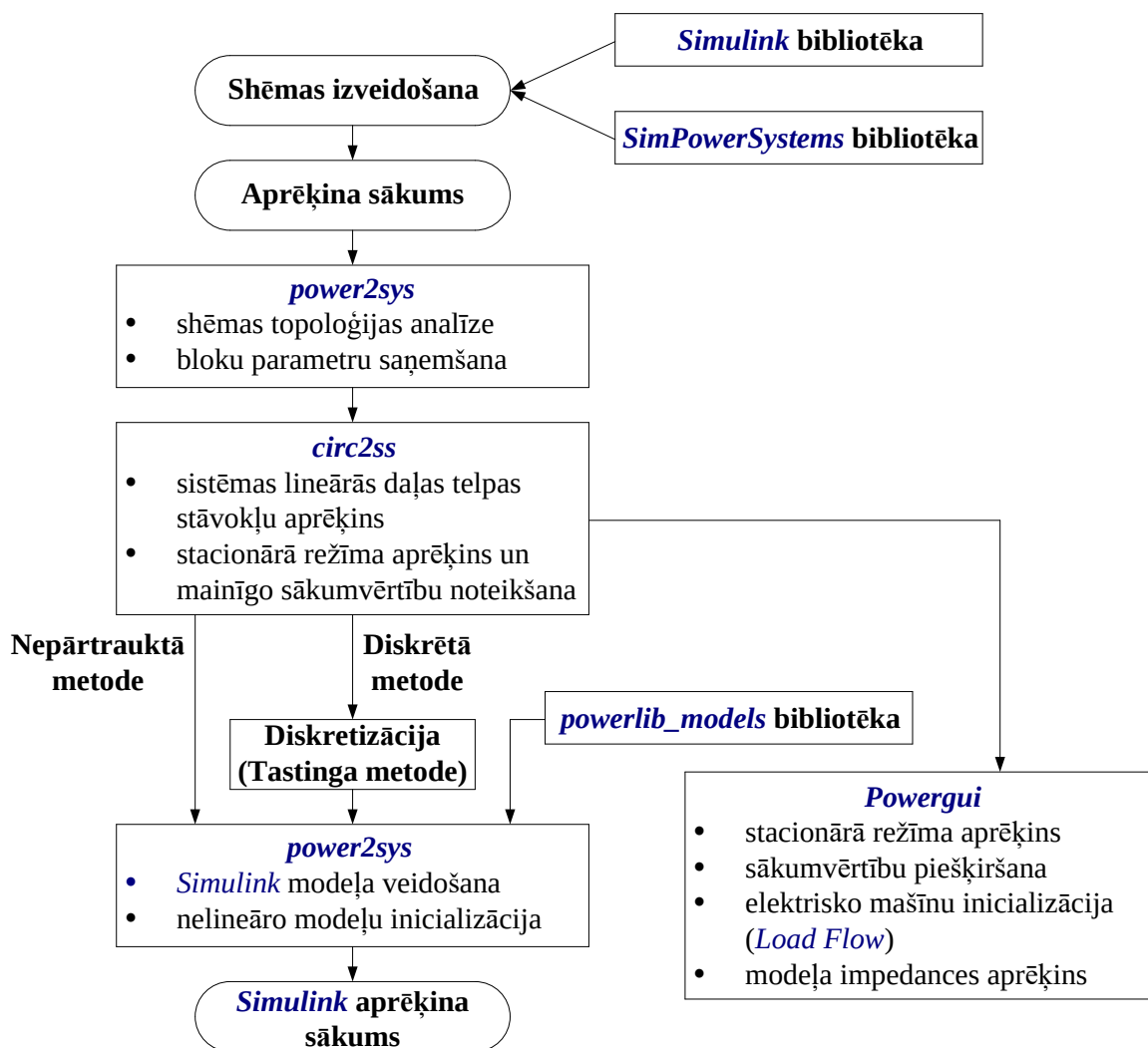
SPS-modeļu veidošanas metodika neatšķiras no *Simulink* bāzes bibliotēku modeļu veidošanas metodikas. Tāpat, kā parastam *Simulink* modelim (S-modelim), ir nepieciešams izpildīt bloku izvietošanu shēmā, uzdot to parametrus, savienot blokus un noteikt modeļa aprēķina parametru kopu. SPS-modeļiem ir pieejams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

1. SPS-bloku ieejas un izejas, atšķirībā no *Simulink* blokiem, neatspoguļo signāla pārraides virzienu, tie faktiski ir ekvivalenti elektriskiem 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 arī 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 savienoti viens ar otru.
5. Aprēķinot shēmu, kas satur nelineārus blokus, izmanto metodes:

- *ode15s* – daudzsoļu mainīgās kārtas (no 1 līdz 5) metode, kas izmanto skaitliskās diferencēšanas formulas,
- *ode23tb* – apslēpta Runge-Kutta metode aprēķina sākumā un metode, kas izmanto apgrieztas otrās kārtas diferencēšanas formulas beigās, tām ir labākie ātrdarbības rezultāti.

1.3. *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* uzsāka šo procesu (1.1.att.) [3].



1.1.att. *SymPowerSystems* modeļa aprēķināšanas algoritms¹

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

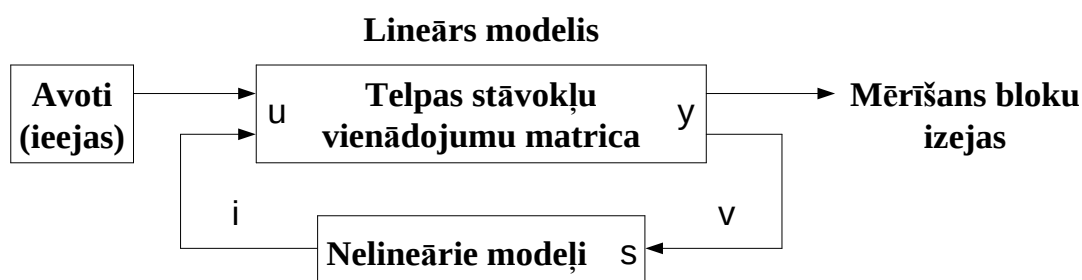
Funkcijas *power2sys* inicializāciju var sadalīt 4 etapos:

- *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 lineārās daļas telpas stāvokļu modeļa aprēķinu izpilda funkcija *circ2ss*. Šajā etapā tiek izveidots stacionārā režīma aprēķins un mainīgo sākumvērtību noteikšana.
- Ja ir uzdota modeļa diskretizācija, tad ir noteikts shēmas diskrētais modelis stāvokļu telpā. Tiek izmantota Tastina metode.
- Tiek veidots *Simulink* modelis un ierakstīts vienā no mērīšanas blokiem. Tas nozīmē, ka 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.

Ekvivalenta *Simulink* modelī tiek izmantots bloks *State-Space* vai bloks *S-function*, lai modelētu sistēmas lineāro daļu. *SimPowerSystems* bloku modelēšanai tiek izmantoti to prototipi no bibliotēkas *powelib_models*. Elektriskās enerģijas avotu modelēšanai tiek izmantoti bibliotēkas *Simulink* avotu bloki *Sources*.

Bloks *Powergui*, ievietots modelī, atļauj piešķirt modeļa mainīgās sākumvērtības, izpildīt stacionārā 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 atgriezeniskās saites ķēdēm [1].



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

1.4. Integrēšanas metodes izvēle

Modeļa aprēķināšanas laikā lietotājam pastāv iespēja integrēšanas metodes izvēlei – nepārtraukta vai diskrēta, ar mainīgo vai fiksēto soli. Neliela izmēra sistēmām nepārtrauktas metodes aprēķins ar mainīgo soli parasti dod lielāko precizitāti. Algoritms ar mainīgo soli ir arī ātrāks, jo soļu skaits ir mazāks, nekā aprēķinām ar fiksēto soli pie vienādas precizitātes.

Energētiskās elektronikas ierīču aprēķinu metodēm ar mainīgo soli ir arī lielāka precizitāte, jo noteic pusvadītāju iekārtu strāvas nulles stāvokļu pāreju tā, ka netiek novēroti signālu pārrāvumi. Tomēr lielajām sistēmām (sistēmas ar lielo stāvokļa mainīgo un nelineāro bloku skaitu) augsta nepārtrauktas metodes precizitāte noved pie aprēķina aizkavēšanas. Šajā gadījumā lielā sistēma (nosacīti) tiek pieņemta par sistēmu, kura satur vairāk nekā 30 mainīgo un vairāk par 6 atslēgām. Šajos gadījumos ir izdevīgi veikt sistēmas diskretizāciju.

Lielākā daļa no *Simulink* esošajām aprēķinu metodēm ar mainīgo soli dod labus rezultātus lineāro sistēmu aprēķināšanā. Tomēr, sistēmām ar nelineāriem elementiem ir nepieciešams izmantot nelineāro sistēmu aprēķinu metodes. Vislielāko nelineāro sistēmu aprēķina ātrumu panāk izmantojot metodes *ode23tb* vai *ode15s* ar noklusētiem uzdotajiem 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 kārta, *ode15s*) = 5.

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

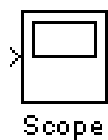
- solis nedrīkst pārsniegt 0.1 no minimālās sistēmas laika konstantes vērtības,
- jā sistēmā ir mainīga sprieguma vai strāvas avoti, solis nedrīkst pārsniegt 0.01 – 0.02 no frekvences vērtības avotam ar lielāko frekvenci.

Absolūtās kļūdas izvēle ir atkarīga no paredzēto signālu maksimālajām vērtībām. Rekomendētā attiecība ir: 0.01 – 0.001 no signāla maksimālās vērtības [2].

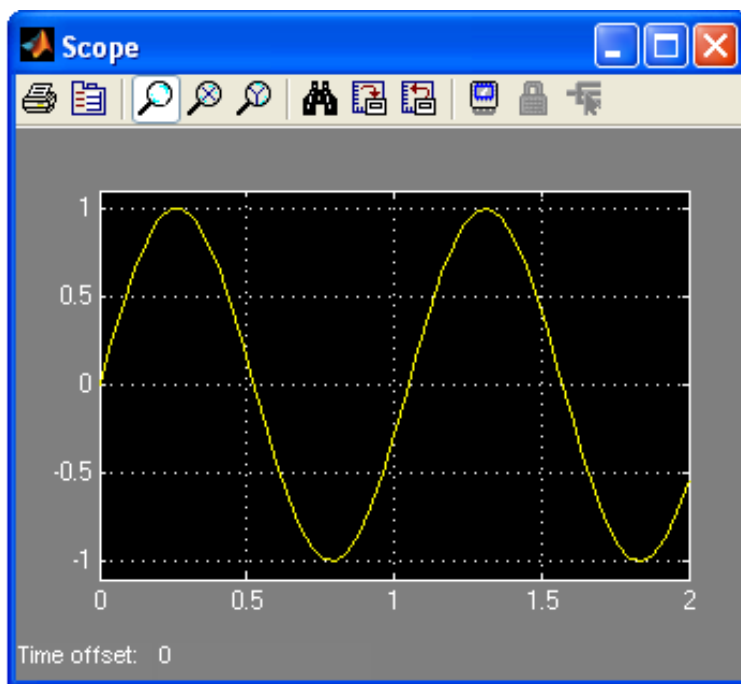
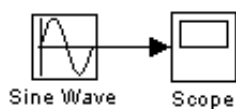
1.5. Izmantoto *Simulink* bloku bibliotēka

Scope	Oscillografs
-------	--------------

Piktogramma:

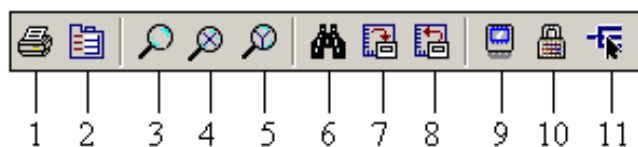


Uzdevums: konstruēt pētīto signālu raksturlīknes kā laika funkcijas. Ļauj novērot modelēšanas procesa signālu izmaiņu. Raksturlīkņu pārskatu logs ir parādīts 1.1.att.



1.1.att. Bloka Scope pārskatu logs

Lai atvērtu pārskatu logu, nepieciešams divreiz uzklikšķināt uz bloka piktogrammas ar „peles” kreiso taustiņu. To var izdarīt jebkura aprēķinā 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 (1.2.att).



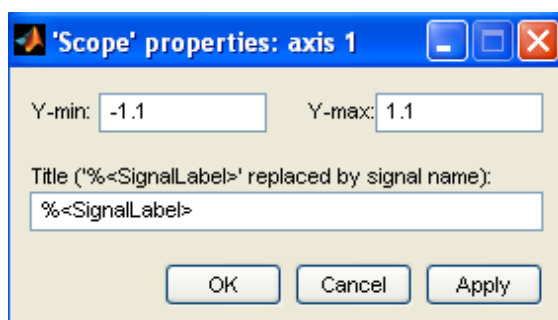
1.2.att. Bloka Scope instrumentu panelis

Instrumentu panelim ir 11 elementi:

1. [Print](#) – izdrukāt oscilogrāfa logu.
2. [Parameters](#) – atvērt parametru iestatīšanas logu.
3. [Zoom](#) – abu asu mēroga palielinājums (2.5x).
4. [Zoom X-axis](#) – horizontāla ass mēroga palielinājums (2.5x).

5. [Zoom Y-axis](#) – vertikāla ass mēroga palielinājums (2.5x).
6. [Autoscale](#) – abu asu automātiska mēroga iestatīšana.
7. [Save current axes settings](#) – tekoša loga mēroga saglabāšana.
8. [Restor saved axes settings](#) – saglabāta loga mēroga iestatīšana.
9. [Floating scope](#) – oscillografa pārvešana „brīvajā” režīmā.
10. [Lock/Unlock axes selection](#) – aizvērt/atvērt saiti starp tekošu 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*.

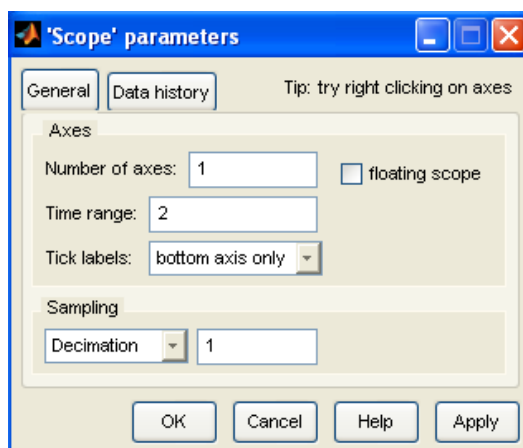
Uzklikšķinot ar labo „peles” taustiņu uz raksturlīknes logu un izvēloties komandu *Axes properties*, atver logu, kurā ar parametru *Y-min* un *Y-max* var norādīt ass robežvērtības. Šajā logā var arī norādīt raksturlīknes nosaukumu (*Title*), aizvietot izteiksmi *%<SignalLabel>* ievadu rindā. Raksturlīkņu īpašību logs ir parādīts 1.3.att.



1.3.att. Bloka *Scope* raksturlīkņu īpašību logs

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

- *General* – vispārējie parametri.
- *Data history* – MATLAB vidē signālu saglabāšanas parametri. Parametru logs ir parādīts 1.4.att.



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

Ar ieliktnā *General* palīdzību tiek uzstādīti sekojošie parametri:

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

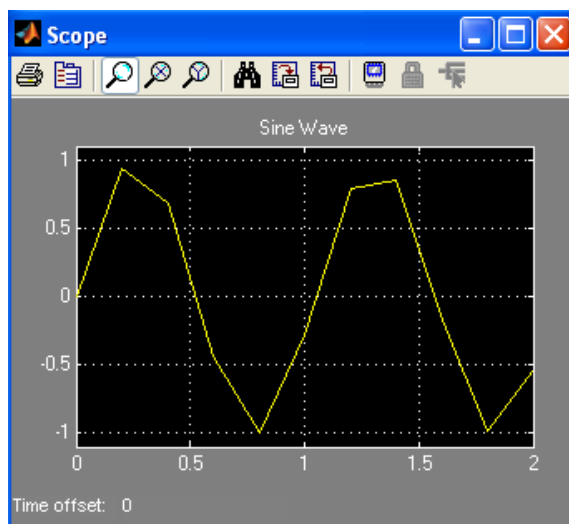
Time range – atspoguļotas raksturlīknes mainīga intervāla vērtība. Ja aprēķina laiks uzstādīts lielāks par parametru *Time range*, tad raksturlīknes izvads būs sadalīts posmos, posmu garumi būs vienādi ar *Time Range* parametra vērtību.

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

- *all* – iezīmes katrai ass,
- *none* – ass un ass iezīmes netiek parādītas,
- *bottom axis only* – horizontālā ass iezīmes tikai apakšējai raksturlīknei.

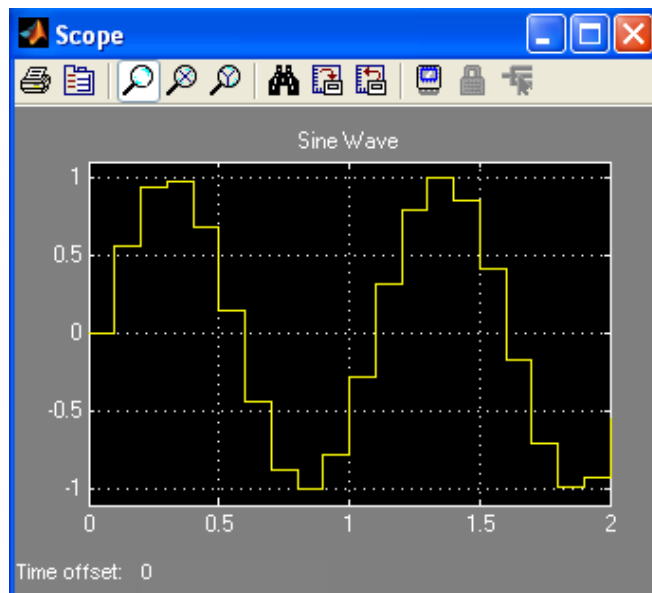
Floting scope – ja atzīmēts, tad oscilogrāfs darbojas „brīvajā” režīmā.

Sampling – raksturlīkņu izvada loga parametru uzstādīšana. 1.5.att. ir parādīta sinusoidālā signāla raksturlīkne, kura ir aprēķināta ar fiksēto soli 0.1 s (parametrs *Decimation* ir vienāds ar 2).



1.5.att. Sinusoidālā signāla raksturlīkne (*Decimation* = 2)

Gadījumā, ja izvada režīms ir uzdots kā *Sample time*, tad to skaitlisko vērtību nosaka kvantēšanas intervāls signāla atspoguļošanas laikā. 1.6.att. ir parādīts sinusoidālā signāla raksturlīkne (*Sample time* vienāds ar 0.1).



1.6.att. Sinusoidālā signāla raksturlīkne ($Sample\ time = 0.1s$)

Ar ieliktņa *Data history* palīdzību tiek uzstādīti sekojošie parametri:

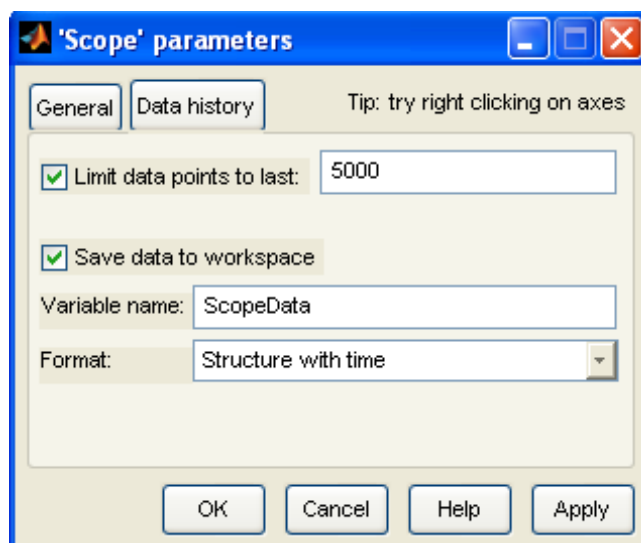
Limit data points to last – maksimālais atspoguļoto aprēķinu punktu skaits. Ja uzradīta vērtība tiek pārsniegta, tad raksturlīknes sākumdaļa tiek nogriezta. Ja parametrs nav atzīmēts, tad *Simulink* automātiski palielina to vērtību, lai atspoguļotu visus aprēķina punktus.

Save data to workspace – signālu vērtību saglabāšana MATLAB vidē.

Variable name – saglabāta MATLAB vidē signāla mainīgs nosaukums.

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

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



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

Display

Displejs

Piktogramma:



Uzdevums: atspoguļot signāla skaitlisko vērtību.

Bloka parametri:

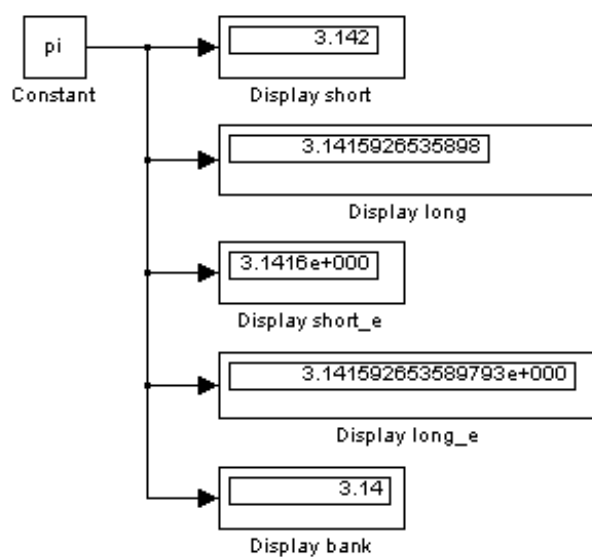
Format – datu atspoguļošanas formāts. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *short* – atspoguļo 5-ciparu skaitļi ar fiksēto decimālo punktu,
- *long* – atspoguļo 15-ciparu skaitļi ar fiksēto decimālo punktu,
- *short_e* – atspoguļo 5-ciparu skaitļi ar „brīvo” decimālo punktu,
- *long_e* – atspoguļo 16-ciparu skaitļi ar „brīvo” decimālo punktu,
- *bank* – atspoguļo skaitļi, kā naudas vērtību,

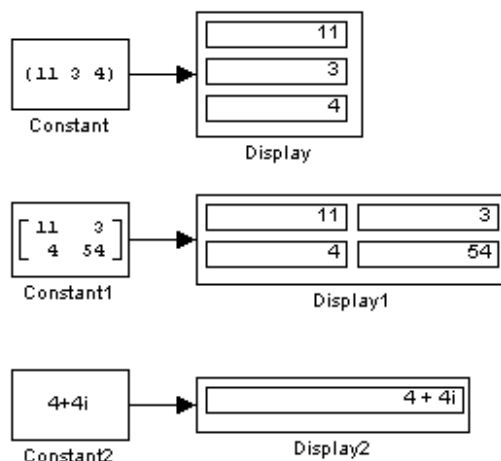
Decimation – izejas signāla atspoguļošanas kārtība, ja *Decimation* = 1 tiek atspoguļota katra izejas signāla vērtība, ja *Decimation* = 2 tiek atspoguļota katra otra izejas signāla vērtība u.t.t.

Sample time – modeļa laikā solis, atspoguļo izejdatu diskretību.

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



a)



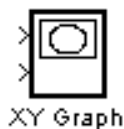
b)

1.8.att. a) Bloka *Display* izmantošana ar dažādām parametra *Format* vērtībām

Bloka *Display* izmantošana vektora, matricas un kompleks signālu atspoguļošanai Bloks *Display* var būt izmantots ne tikai skalāro signālu atspoguļošanai, bet arī vektoru, matricas un kompleks signāliem (1.8b.att.).

XY Graph	XY raksturlīkņu veidotājs
-----------------	----------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: konstruēt viena signāla raksturlīkni otra signāla funkcijā (funkcija $Y(X)$).

Bloka parametri:

x_{-min} – x ass minimāla signāla vērtība,

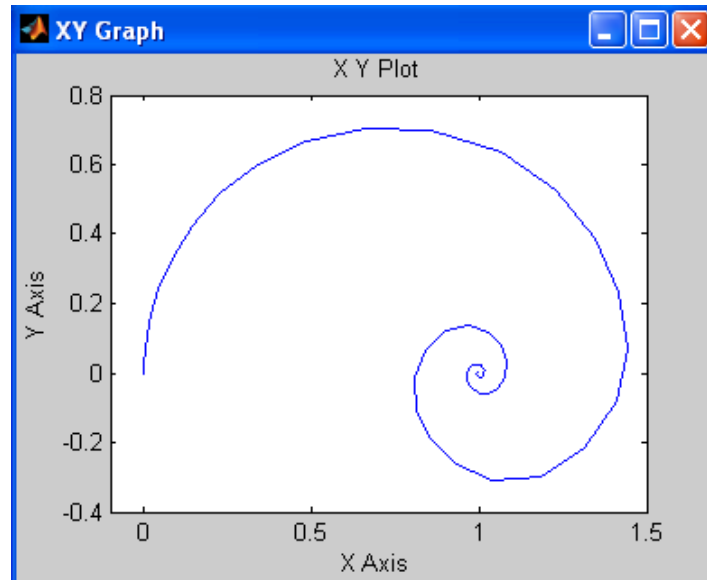
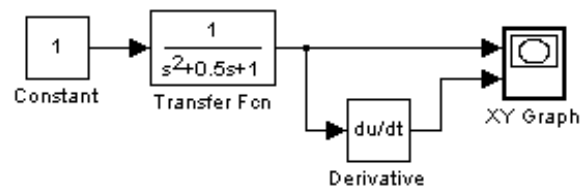
x_{-max} – x ass maksimāla signāla vērtība,

y_{-min} – y ass minimāla signāla vērtība,

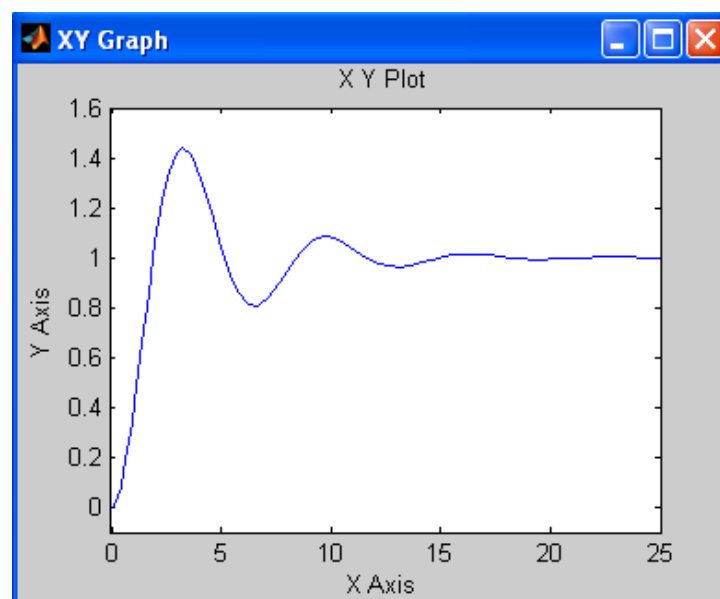
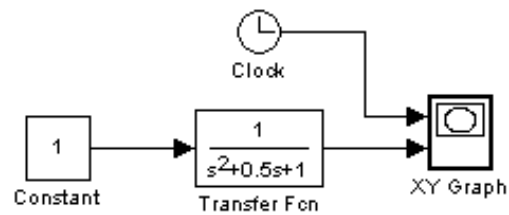
y_{-max} – y ass maksimāla signāla vērtība,

Sample time - modeļa laikā solis, atspoguļo izejdatu diskrētību.

Blokam ir divas ieejas. Augšējā ieeja paredzēta X argumenta signālam, bet apakšējā ieeja ir paredzēta Y funkcijas signālam. Bloka izmantošanas piemēri ir parādīti zemāk (1.9.att.).



a)



b)

1.9.att. Bloka XY Graph izmantošanas piemēri: svārstības posma fāzu trajektorija (a), funkcijas atkarība no laika (b)

Piktogramma:



Uzdevums: apvienot ieejas signālus vektorā.

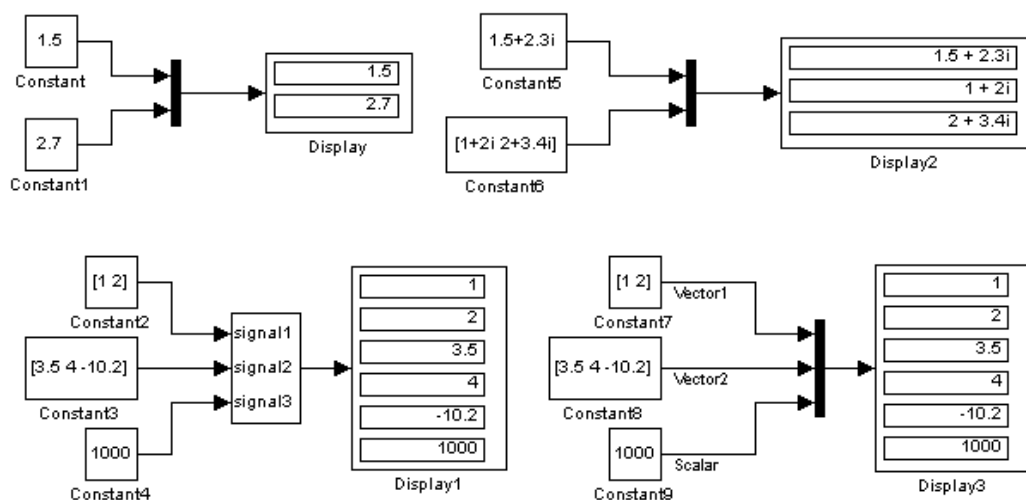
Bloka parametri:

Number of inputs – ieeju skaits.

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

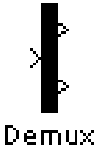
- **bar** – vertikāls šaurs melns taisnstūris,
- **signals** – balts taisnstūris ar ieejas signālu apzīmējumiem,
- **none** – balts taisnstūris ar bloka nosaukumu.

Ieejas signāli var būt skalārie un (vai) vektora formā. Jā starp ieejas signāliem ir vektori, tad ieeju skaitu var uzdot kā vektoru ar katra ieejas vektora elementu skaitu. Piemēram, ja izteiksme 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 parametrā *Number of inputs*, tad aprēķinā sākumā *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 atbilstošiem savienojošām līnijām. Signāliem, padotiem uz bloka ieeju jābūt viena tipa (reāliem vai kompleksiem skaitļiem). Bloka *Mux* izmantošanas piemēri ir parādīti zemāk (1.10.att.).



1.10.att. Bloka *Mux* izmantošanas piemēri

Piktogramma:



Uzdevums: sadalīt ieejas vektora signālu atsevišķos elementos.

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.

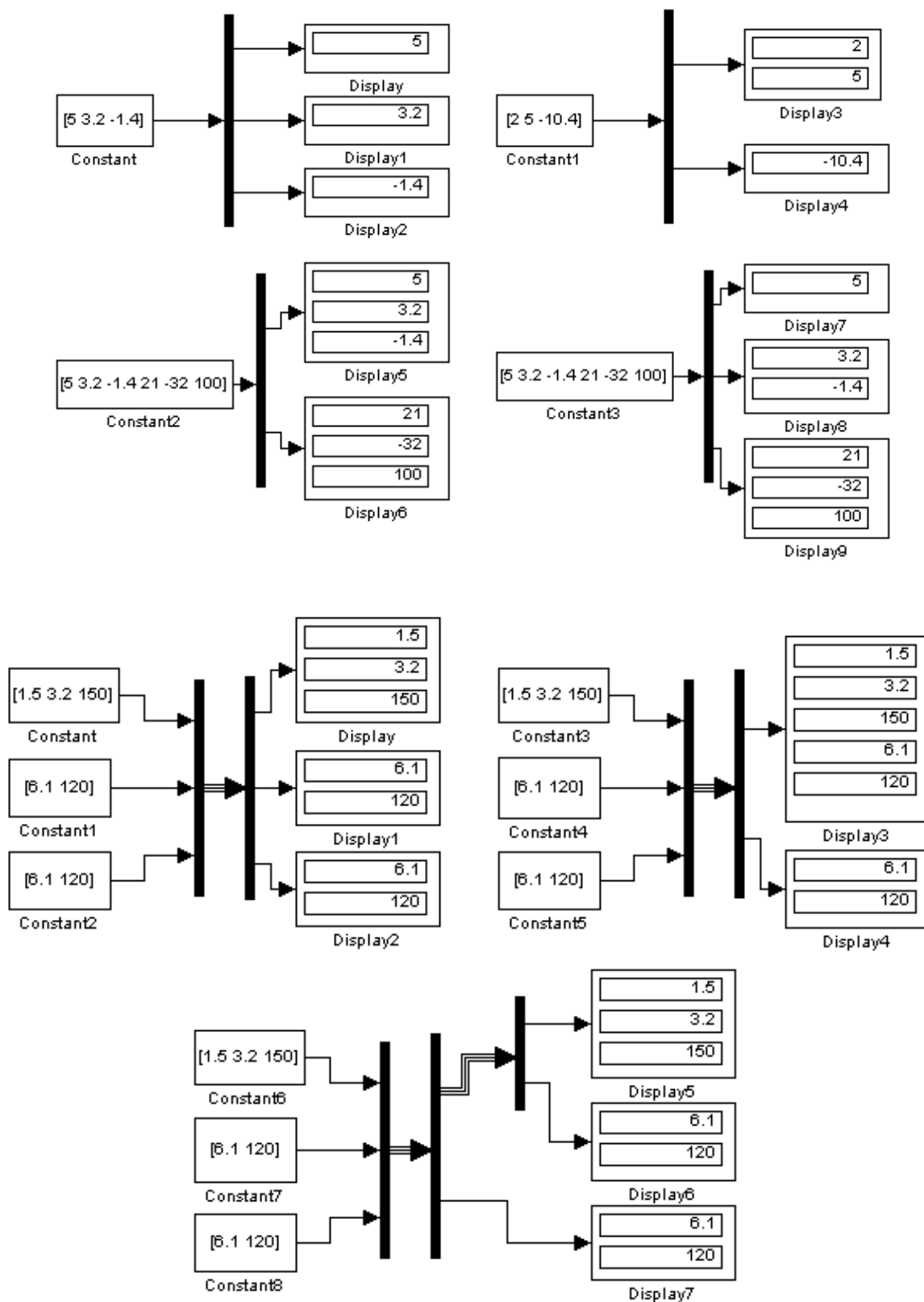
Ieejas signāls parastā režīmā ir vektors, formēts jebkurā veidā. Izejas signāli ir skalārie vai vektorā formā, to skaitu un elementu skaitu nosaka parametrs *Number of outputs*, kā arī izejas vektora elementu skaits. Ja izeju skaits **P** (*Number of outputs* parametra vērtība) ir vienāds ar izejas signāla **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 attiecībai N/P , noapaļotu līdz tuvākajam skaitlim, bet pēdējā 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 vai vektors.



1.11.att. Bloka Demux izmantošanas piemēri

Sum	Summas skaitļošanas bloks
-----	---------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: formēt ieejas signālu vērtību summu.

Bloka parametri:

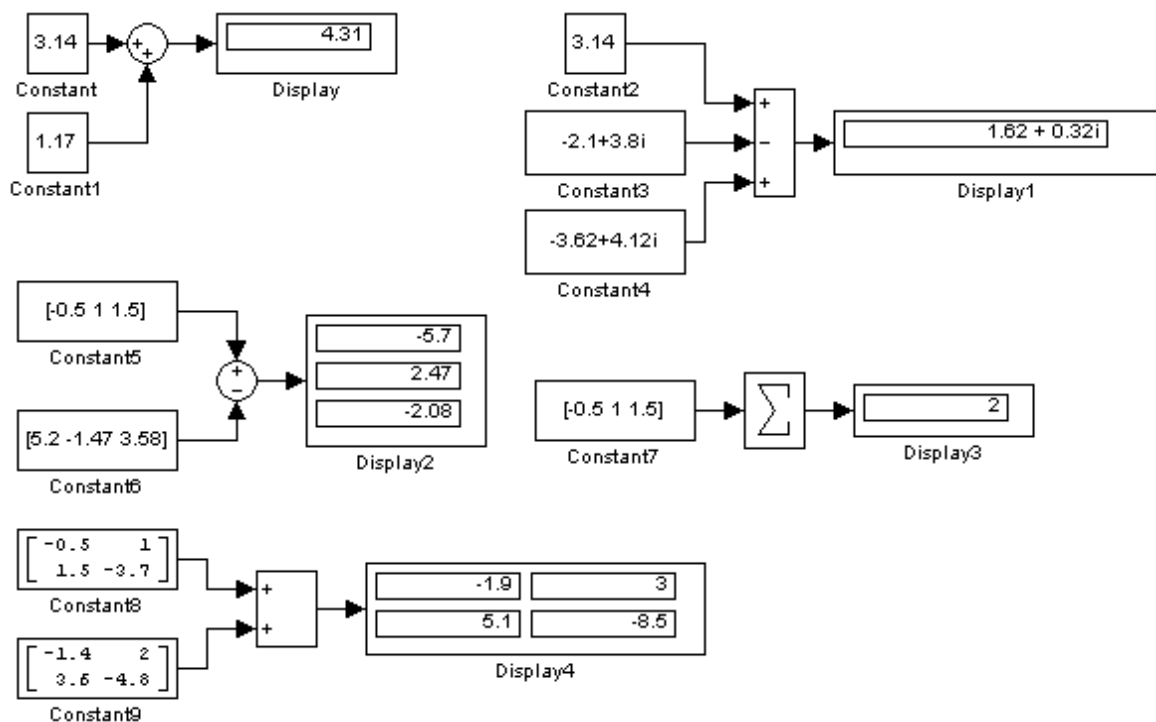
Icon shape – bloka forma. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *round* – aplis,
- *rectangular* – taisnstūris.

List of signs – zīmju saraksts, tajā var izmantot sekojošas zīmes: + (plus), - (mīnus) un | (zīmju atdalītājs).

Sample time – modeļa laikā solis, atspoguļo izejdatu diskretitību.

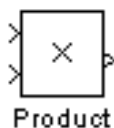
Ieeju skaitu un veiktu operāciju (summēšana vai atņemšana) noteic parametra *List of signs* zīmju saraksts, signālu ieejas ir apzīmēti ar attiecīgām zīmēm. Parametrā *List of signs* var arī apzīmēt ieeju skaitu ar ciparu. Šajā gadījumā visas ieejas būs summējošas. Summēto signālu tiem, kā arī signāla elementu skaitam ir jāsakrīt.



1.12.att. Bloka *Sum* izmantošanas piemēri

Product	Reizinājuma skaitļošanas bloks
---------	--------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: izveidot ieejas signālu vērtību reizinājumu.

Bloka parametri:

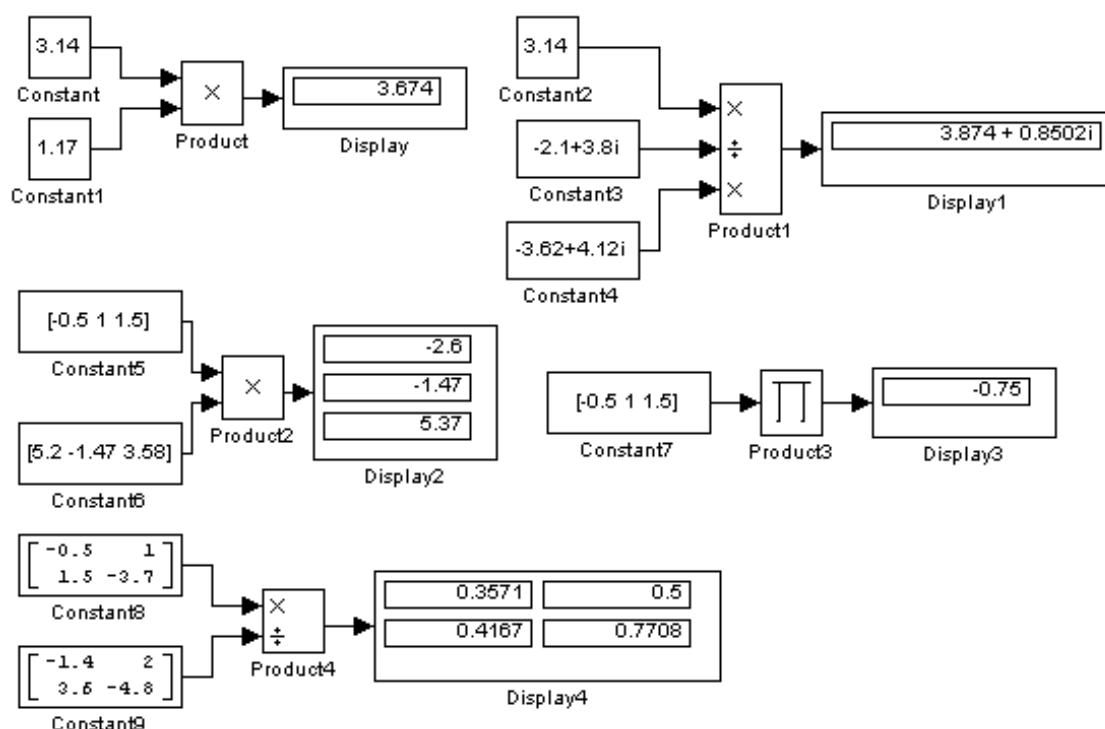
Number of inputs – ieeju skaits, tajā var izmantot sekojošas zīmes: * (reizināt), / (dalīt).

Multiplication – operācijas izpildes metode. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *element-wise* – pa atsevišķiem elementiem,
- *matrix* – matricas veida.

Sample time – modeļa laikā solis, atspoguļo izejdatu diskretību.

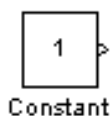
Ieeju skaitu un veiktu operāciju (reizināšana vai dalīšana) noteic parametra *Number of inputs* zīmju saraksts, signālu ieejas ir apzīmēti ar attiecīgām zīmēm. Parametrā *Number of inputs* var arī apzīmēt ieeju skaitu ar ciparu. Šajā gadījumā visas ieejas būs reizināšanas. Reizināto signālu tiem, kā arī signāla elementu skaitam ir jāsakrīt.



1.13.att. Bloka *Product* izmantošanas piemēri

Constant	Konstante
----------	-----------

Piktogramma:



Uzdevums: veidot nemainīga līmeņa signālu.

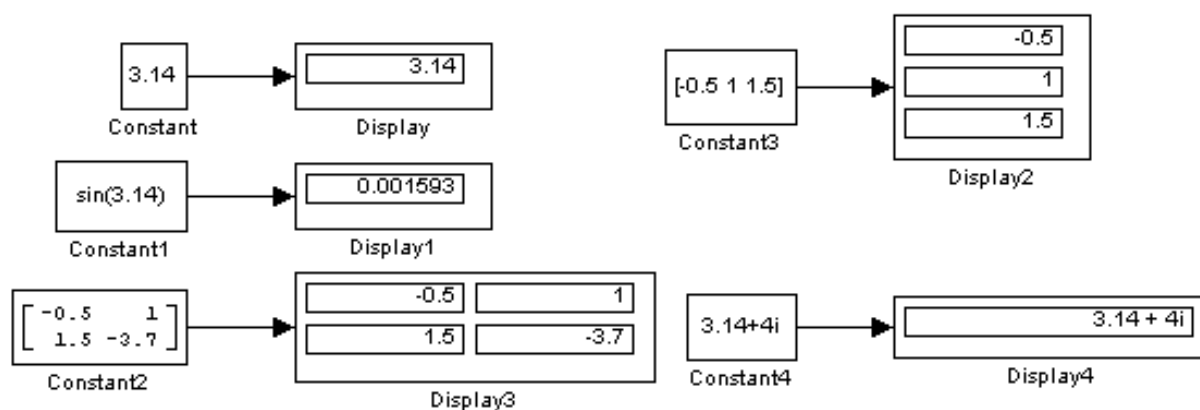
Bloka parametri:

Constant value – nemainīga signāla vērtība.

Sample time – modeļa laikā solis, atspoguļo izejdatu diskretitību.

Interpret vector parameters as 1-D – interpretēt parametru vektoru kā viendimensijas (jā atzīmēts).

Konstantes signāls var būt reāls vai komplekss skaitlis, vektors vai matrica.



1.14.att. Bloka *Constant* izmantošanas piemēri

Clock	Pulkstenis
-------	------------

Piktogramma:

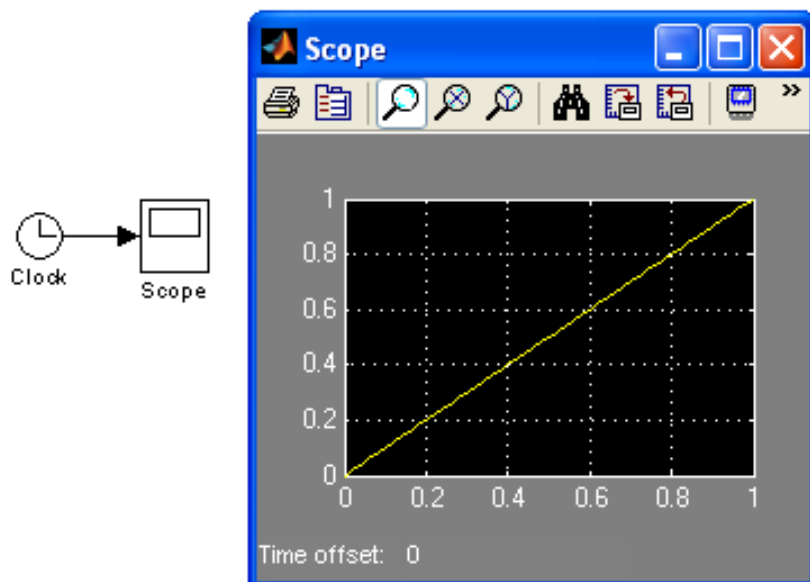


Uzdevums: formēt signālu, kurā vērtība katrā aprēķina solī ir vienāda ar tekošu modelēšanas laiku.

Bloka parametri:

Display time – ja atzīmēts, tad tiek parādīta bloka laika vērtība.

Decimation – solis, ar kuru atjaunojas bloka laika rādījumi (ja atzīmēts parametrs *Display time*).



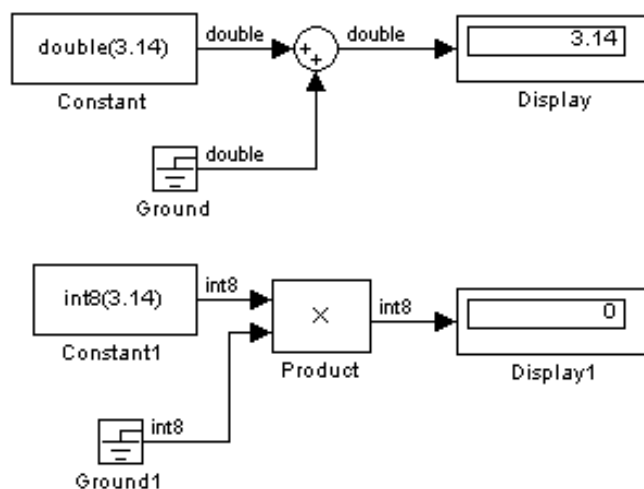
1.15.att. Bloka *Clock* izmantošanas piemērs

Ground	Nulles signāla veidošanas bloks
---------------	--

Piktogramma:



Uzdevums: formēt nulles līmeņa signālu. Parametru nav. Ja kāda no modelēs bloku ieejam nav pieslēgta, tad MATLAB loga parādās brīdinošs ziņojums. Lai to novērstu pie nepieslēgtas ieejas, pieslēdz nulles signālu veidojošo bloku *Ground*. Zemāk ir parādīti bloka *Ground* izmantošanas piemēri (1.16.att.).



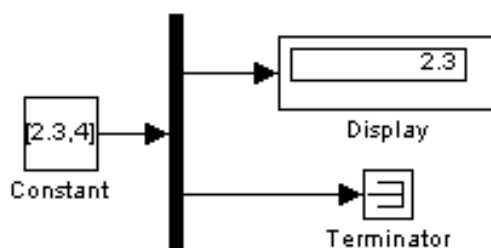
1.16.att. Bloka *Ground* izmantošanas piemērs

Terminator	Terminators
------------	-------------

Piktogramma:



Uzdevums: izmantot cita bloka izejas signāla piesaistīšanai. Ja kāda no modeļiem bloku izejām nav pieslēgta, tad MATLAB loga parādās brīdinošs ziņojums. Zemāk ir parādīti bloka *Terminator* izmantošanas piemērs (1.17.att.).



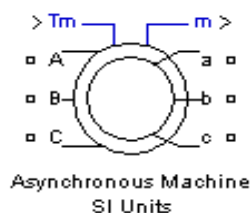
1.17.att. Bloka *Terminator* izmantošanas piemērs

2. Asinhronā dzinēja modelēšana

2.1. Izmantoto bloku bibliotēka

Asynchronous Machine	Asinhrona mašīna
----------------------	------------------

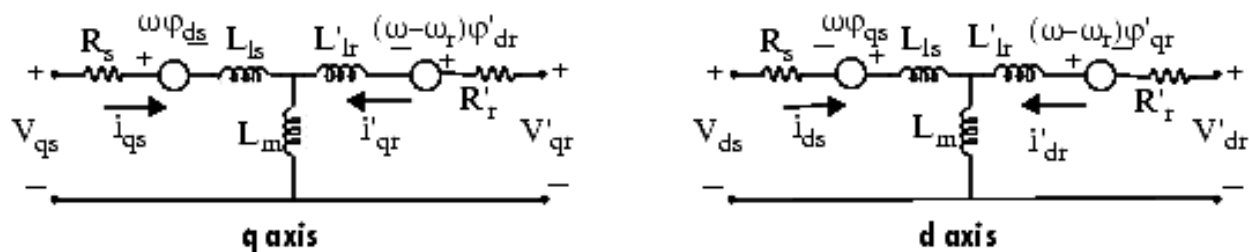
Piktogramma:



Uzdevums: modelēt asinhronu elektrisko mašīnu dzinēja vai ģeneratora režīmus. Darba režīms tiek apzīmēts ar mašīnas elektromagnētiskā momenta zīmi: pozitīvo vai negatīvo.

Portos **A**, **B** un **C** ir mašīnas statora tinumu izvadi, bet portos **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 spriegumiem un plūsmas nekustīgās un rotējošās koordinātu sistēmās, elektromagnētiskais moments, vārpstas rotēšanas ātrums, kā arī vārpstas stāvokļa leņķis. Lai būtu ērtāk dabūt mašīnas mainīgās vērtības,

SimPowerSystems bibliotēkā ir paredzēts *Machines Measurement Demux* bloks. Asinhronās mašīnas modelis iekļauj sevī mašīnas elektriskās daļas modeli, izveidotu kā telpas ceturtās kārtas stāvokļu sistēmu un mehāniskās daļas modeli otrās kārtas sistēmas veidā. Visi mašīnas elektriskie parametri un mainīgie piesaistīti statoram. Mašīnas elektriskās daļas sākuma vienādojumi ir uzrakstīti divfāzu (dq -ass) koordinātu sistēmā. Attēlā 2.1. ir parādīta mašīnas aizvietošanas shēma un tās vienādojumi.



2.1.att. Asinhronas mašīnas aizvietošanas shēma

Parametru logs:

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.

Parameters

Preset model: **No**

☒ Show detailed parameters

Rotor type: **Squirrel-cage**

Reference frame: **Stationary**

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(WA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[3e3 380 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[3.0152 0.0040]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[1.5876 0.0040]

Mutual inductance Lm (H):

0.2386

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

[0.01 0.00295 1]

Initial conditions

[1.0 0,0,0 0,0,0]

OK Cancel Help Apply

Mašīnas elektriskās daļas vienādojumi:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (2.1) \quad \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.5)$$

$$V_{qs} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (2.2) \quad \varphi_{ds} = L_s i_{qs} + L_m i'_{dr} \quad (2.6)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (2.3) \quad \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.7)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (2.4) \quad \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.8)$$

$$T_e = 1.5(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (2.9) \quad L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.10) \quad L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2.11)$$

Mašīnas vienādojumu sistēmā iekļautiem indeksiem ir sekojoša nozīme:

d – mainīga projekcija uz **d** ass,

q – mainīga projekcija uz **q** ass,

r – rotora mainīgais vai parametrs,

s – statora mainīgais vai parametrs,

l – noplūdes induktivitāte,

m – magnetizācijas ķēdes induktivitāte.

Mašīnas mehāniskā daļa tiek aprakstīta ar diviem vienādojumiem:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.13)$$

Mašīnas vienādojumu sistēmā iekļautiem mainīgiem ir sekojoša nozīme:

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 pilnas 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,

T_m - kustības pretošanās moments,

T_e - elektromagnētiskais moments,

F - kopējais rotora un statora berzes koeficients,

H - kopēja rotora un statora inerces konstanta,

ω_m - rotora leņķiskais ātrums,

θ_m - rotora leņķiskais stāvoklis,

p - polu pāru skaits.

Bloka parametri:

Rotor type:

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

- **Squirrel-Cage** – īsi slēgts rotors <vāveres rats>,
- **Wound** – fāzu 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 [**Pn**(VA), **Un**(V), **fn**(Hz)]:

[Nomināla jauda **Pn**(W), nominālais līnispriegums **Un**(V) un nomināla frekvence **fn**(Hz)].

Stator [**Rs**(Ohm) **Lls**(H)]:

[Statora pretestība **Rs**(Ω) un noplūdes induktivitāte **Lls**(H)].

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

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

Mutual inductance $Lm(H)$:

[Savstarpējā induktivitāte $Lm (H)$].

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

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

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

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

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

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

Machines Measurement Demux

Elektriskās mašīnas mainīgo mērījumu bloks

Piktogramma:



Uzdevums: iegūt elektriskās mašīnas mainīgos (kas raksturo to stāvokli) no izejas vektora. Bloks darbojas kopā ar sinhrono un asinhrono dzinēju modeļiem.

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.

Atkarībā no izvēlēta mašīnas tipa, parametru logā būs attēlots dažāds mašīnas mainīgo parametru sakopojums. Zemāk ir apskatīts asinhronas mašīnas mainīgo pieejamais saraksts.

Asinhrona mašīna:

Rotor currents [$i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \]$ – rotora tinumu strāvas,

Rotor currents [$i_{r \ q} \ i_{r \ d} \]$ – rotora strāvu projekcijas uz **q** un **d** ass,

Rotor fluxes [$\phi_{hir \ q} \ \phi_{hir \ d} \]$ – rotora plūsmu projekcijas uz **q** un **d** ass,

Rotor voltages [$v_{r \ q} \ v_{r \ d} \]$ – rotora spriegumu projekcijas uz **q** un **d** ass,

Stator currents [$i_a \ i_b \ i_c \] \ A$ – statora tinumu strāvas,

Stator currents [$i_{s \ q} \ i_{s \ d} \] \ A$ – statora strāvu projekcijas uz **q** un **d** ass,

Stator fluxes [$\phi_{his \ q} \ \phi_{his \ d} \]$ – statora plūsmu projekcijas uz **q** un **d** ass,

Stator voltages [$v_{s \ q} \ v_{s \ d} \] \ V$ – statora spriegumu projekcijas uz **q** un **d** ass,

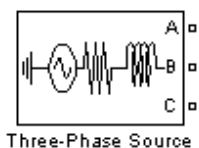
Rotor speed [$\omega_m \] \ rad/s$ – rotora rotēšanas ātrums,

Electromagnetic torque [$T_e \] \ N.m$ – elektromagnētiskais moments,

Rotor angle [$\theta_{em} \] \ rad$ – rotora leņķiskais stāvoklis.

Three-Phase Source	Trīsfāzu sprieguma avots
---------------------------	---------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: izveidot trīsfāzu sprieguma sistēmu.

Bloka parametri:

Phase-to-phase rms voltage (V):

[Līnijas sprieguma iedarbes vērtība (V)].

Phase angle of phase A (deg):

[Sprieguma sākuma fāze A fāzē (grad)].

Frequency (Hz):

[Frekvence (Hz)]. Avota frekvence.

Internal connection:

[Avota fāzu savienojums]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

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

Specify impedance using short-circuit level:

[Uzdot pilno avota pretestību izmantojot īssavienojuma parametrus]. Ja tiek atzīmēts, logā parādās papild ailes 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):

[Trīsfāzu īssavienojuma jauda pie bāzes sprieguma vērtības (VA)].

Base voltage (Vrms ph-ph):

[Bāzes spriegums]. Avota bāzes līnijas sprieguma vērtība, pie kuras tiek aprēķināta īssavienojuma jauda.

X/R ratio:

[Induktīvas un aktīvas pretestības attiecība]. Uzdodot avota impedanci, izmantojot īssavienojuma jaudu, reaktīva pretestība tiek aprēķināta pēc formulas [1-4]:

$$X = \frac{U_{\alpha}^2}{Q_{\alpha}} \quad (2.14)$$

kur:

Q_{α} - īssavienojuma jauda,

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

Savukārt reaktīva pretestība tiek aprēķināta pēc formulas:

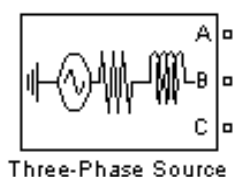
$$R = \frac{X}{k} \quad (2.15)$$

kur:

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

3-Phase Programmable Voltage Source	Programmējams Trīsfāzu sprieguma avots
--	---

Piktogramma:



Uzdevums: izveidot trīsfāzu sprieguma sistēmu ar programmējamiem amplitūdas, fāzes, frekvences un harmoniska sastāva izmaiņām laikā.

Bloka parametri:

Positive-sequence: [Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)]:

[Tieša sekvence: [Amplitūda (Līnijas spriegums V) Fāze (grādi) Frekvence (Hz)]. Parametrs tiek uzdots, kā trīs elementu vektors.

Time variation of:

[Izmaiņa laikā]. Avota parametrs, kas izmainās laikā. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *None* – mainīgo parametru nav,
- *Amplitude* – amplitūda,
- *Phase* – fāze,
- *Frequency* – frekvence.

Type of variation:

[Izmaiņas veids]. Uzdot izvēlēta avota parametra izmaiņas veidu. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Step* – pakāpeniskā izmaiņa,
- *Ramp* – lineārā izmaiņa,
- *Modulation* – modulācija,
- *Table of time-amplitude pairs* – tabulas veidā (laiks-vērtība).

Step magnitude:

[Pakāpeniskās izmaiņas līmenis]. Uzdot izmaiņas skaitlisko vērtību (spriegumam – nosacītās vienības, fāzei – grādos, frekvencei – hercos).

Rate of change:

[Vērtības izmaiņas ātrums]. Uzdot parametra izmaiņas ātrumu viena sekundē.

Amplitude of the modulation:

[Modulācijas amplitūda]. Šajā ailē tiek uzdots avota parametra modulācijas amplitūda.

Frequency of the modulation:

[Modulācijas frekvence].

Variation timing (s): [Start End]:

[Izmaiņas iedarbības laiks [Sākums Beigas]] Parametrs noteic izvēlēta parametra izmaiņas sākumu un beigas simulācijas laikā. Tiek uzdots, kā divu elementu vektors.

Fundamental and/or Harmonic generation:

[Tiešas, apgrieztas vai nulles secības pārklājums un/vai augstāko harmoniku pārklājums].

A: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0, 1 or 2)]:

[A: [Harmonika (n) Amplitūdas Fāze (grādi) Secība (0, 1 vai 2)]]]. Ailē tiek uzdots ģenerētas sprieguma harmonikas parametru vektors: harmonikas numurs, amplitūda (nosacītās vienības), sākuma fāze, secība (0 – nulles, 1 – tieša, 2 – apgriezta).

B: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0, 1 or 2)]:

[B: [Harmonika (n) Amplitūdas fāze (grādi) Secība (0, 1 vai 2)]]]. Ailē tiek uzdots ģenerētas sprieguma harmonikas parametru vektors: harmonikas numurs, amplitūda (nosacītās vienības), sākuma fāze, secība (0 – nulles, 1 – tieša, 2 – apgriezta).

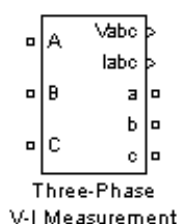
Harmonic timing (s): [Start End]:

[Harmonikas iedarbības laiks (s) [Sākums Beigas]. Ailē tiek uzdots harmoniku ģenerācijas laika posms.

Ideāla sprieguma avots, pretestība ir vienāda ar nulli.

Three-Phase V-I Measurement	Trīsfāzu mērītājs
-----------------------------	-------------------

Piktogramma:



Uzdevums: veikt trīsfāzu ķēžu spriegumu un strāvu mērīšanu.

Bloka parametri:

Voltage Measurement:

[Spriegumu mērīšana]. Šajā ailē ir izvēlēts mērīts spriegums:

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

Use a label:

[Izmantot iezīmi]. Ja apzīmēts signāls iet uz bloku *From*, tad bloka *From* parametram *Goto tag* jāatbilst iezīmes nosaukumam, kas ir uzdots ailē *Signal label*.

Signal label:

[Signāla iezīme].

Voltages in p.u.:

[Sprieguma mērīšanas nosacītās vienības]. Mērītie spriegumi būs pārveidoti saskaņā ar formulu [1-4, 9-14]:

$$U_* = \frac{U}{\frac{U_b}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}} \quad (2.16)$$

kur:

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

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, kurš iet uz bloku *From*, tad bloka *From* parametram *Goto tag* jāatbilst iezīmes nosaukumam, kas ir uzdots ailē *Signal label*.

Signal label:

[Signāla iezīme].

Currents in p.u.:

[Strāvas mērīšana nosacītās vienības]. Mērītas strāvas būs pārveidotas saskaņā ar formulu [1-4, 9-14]:

$$I_* = \frac{I}{\frac{P_b}{U_b \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}} \quad (2.17)$$

kur:

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

Base power (VA 3 phase):

[Bāzes jauda].

Output signal:

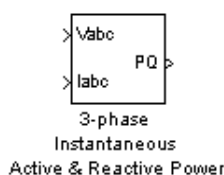
[Izejas signāls]. Izejas signāla veids. Parametra izvēle ir iespējama tikai tad, ja ar bloka *Powergui* palīdzību ir uzstādīts maiņstrāvas aprēķina režīms (*Phasor simulation*). Šajā gadījumā parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

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

Bloka izejas signāli ir mērīto mainīgo signālu vektori.

3-phase Instantaneous Active & Reactive Power	Trīsfāzu aktīvas un reaktīvas jaudas mērītājs
--	--

Piktogramma:

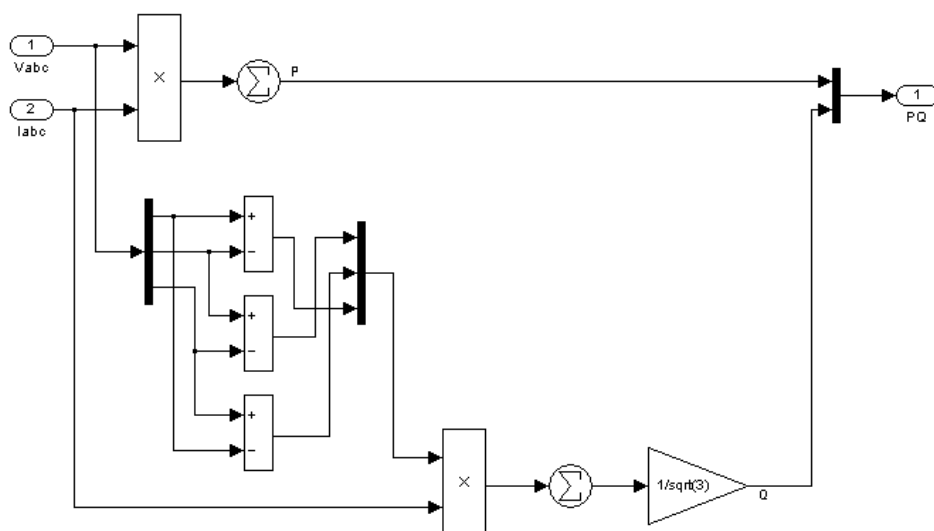


Uzdevums: mērīt trīsfāžu aktīvo un reaktīvo jaudu periodiskām **A**, **B** un **C** fāzes sprieguma-strāvas pārim. Aprēķins tiek veikts pēc sekojošām izteiksmēm [1-4,9-14]:

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (2.18)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (V_{bc} I_a + V_{ca} I_b + V_{ab} I_c) \quad (2.19)$$

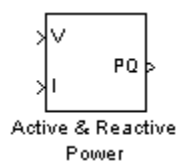
Vienādojums (2.19) ir patiess tikai balansētai un brīvai no harmonikām sistēmai.



2.2.att. Trīsfāzu aktīvas un reaktīvas jaudas mērītāja bloka shēma

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

Piktogramma:



Uzdevums: mērīt aktīvajam un reaktīvo jaudu periodiskam sprieguma-strāvas pārim, kura satur harmonikas. P un Q tiek aprēķināti, ņemot viena cikla vidējo VI reizināšanas vērtību.

$$P = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (V(\omega t) \cdot I(\omega t)) dt \quad (2.20)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (V(\omega t) \cdot I(\omega t - \frac{\pi}{2})) dt \quad (2.21)$$

kur:

P - aktīva jauda (W),

Q - reaktīva jauda (VAR),

T - periods (s),

ω - leņķiskais ātrums (rad/s),

I - strāvas vērtība (A),

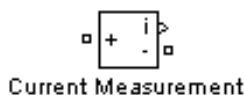
V - sprieguma vērtība (V).

Bloka parametri:

Fundamental frequency (Hz) – fundamentāla frekvence (Hz).

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

Piktogramma:



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

Bloka parametri:

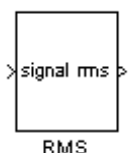
Output signal:

[Izejas signāls]. Izejas signāla veids. Parametra izvēle ar 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 – reāla un imagināra signāla sastāvdaļām,
- *Magnitude-Angle* – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – signāla amplitūdas un argumenta.

RMS	Vidēja kvadrātiska kvadrātsaknes mērītājs
-----	---

Piktogramma:



Uzdevums: veikt strāvas, vai sprieguma ieejoša signāla vidēja kvadrātiska kvadrātsaknes mērījumus [1-4,9-14].

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t)^2 dt} \quad (2.22)$$

kur:

$f(t)$ - ieejas signāls,

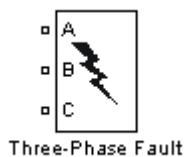
T - periods (s).

Bloka parametri:

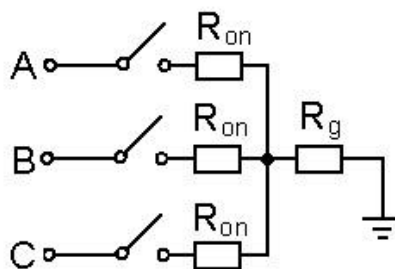
Fundamental frequency (Hz) – fundamentāla frekvence (Hz).

Three-Phase Fault	Trīsfāzu īssavienojumu modelētais
-------------------	-----------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: modelēt trīs fāžu iekārtu, kura veido starpfāžu īsslēgumu, kā arī zemes slēgumus. Tā shēma ir parādīta zemāk att.2.3. Jā zemes slēgums netiek atzīmēts, pretestībai **R_g** tiek automātiski piešķirta vērtība $10^6 \Omega$.



2.3.att. *Three-Phase Fault* bloka shēma

Bloka parametri:

Phase A Fault:

[Fāzes A kontakta vadība]. Ja netiek atzīmēts, tad 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, tad 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, tad 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 $R_{on}(Ohm)$:

[Kontaktu pretestība ieslēgtā stāvoklī **R_{on}** (Ω)].

Ground Fault:

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

Ground resistance $R_g(Ohm)$:

[Zemējuma pretestība R_g (Ω)]. Zemējuma pretestība nevar būt vienāda ar nulli.

External control of switching times:

[Ārējā 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 laika momentā, kas tiek uzdots ar vektora *Transition times* palīdzību (0 – atslēgts kontakts, 1 – ieslēgts kontakts).

Transition times (s):

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

Initial status of fault [Phase A Phase B Phase C]:

[Kontaktu sākuma stāvoklis]. Parametrs tiek uzdots, kā vektors, kas sastāv no trīs elementiem. Tie nosaka kontaktu stāvokli sākuma laika momentā (0 – atslēgts kontakts, 1 – ieslēgts kontakts). Parametrs ir pieejams, ja process tiek vadīts ar ārējo signālu.

Snubbers resistance $R_p(Ohm)$:

[Loka dzesēšanas ķēdes pretestība **R_p** (Ω)].

Snubbers capacitance $C_p(F)$:

[Loka dzesēšanas ķēdes kapacitāte **C_p** (F)].

Measurements:

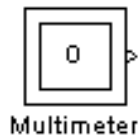
[Mērītie mainīgie]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- ***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).

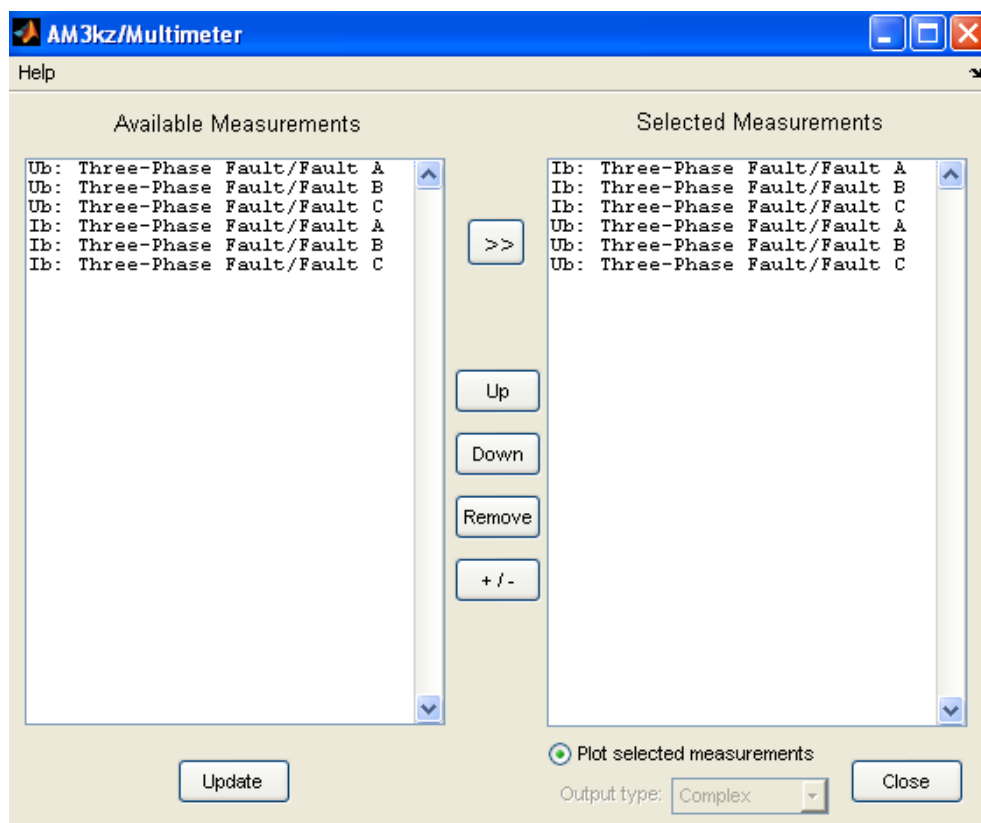
Multimeter	Universālais mērītājs
-------------------	------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: izveidot bibliotēkas *SimPowerSystem* bloku, kuriem dialoga logā ir uzstādīts parametrs *Measurments* (mērītie mainīgie), strāvas un sprieguma mērīšanu.

Parametru logs:



Bloka parametri:

[Available Measurements:](#)

[Pieejamie mainīgie]. Šajā ailē tiek parādīti bloki, kuriem dialoga logā ir uzstādīts parametrs *Measurments* (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 saraksta augšpusē,
- **Down** – pārcelt apzīmēto mainīgo mērīto saraksta leļpusē,
- **Remove** – izdzēst apzīmēto mainīgo no mērīto mainīgo saraksta,
- **+/-** – izmainīt apzīmēta mainīgā zīmi.

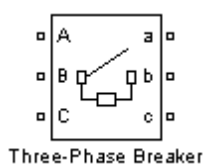
Output signal:

[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 – reāla un imagināra signāla sastāvdaļām,
- **Magnitude-Angle** – vektors, kas sastāv no diviem elementiem – signāla amplitūdas un argumenta.

Three-Phase Breaker	Trīsfāzu slēdzis
----------------------------	-------------------------

Piktogramma:



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, tad netiek pārslēgts. Kontakta stāvokli nosaka parametrs *Initial status of breakers*.

Switching of phase B:

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

Switching of phase C:

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

Transition times (s):

[Kontakta ieslēgšanas (atslēgšanas) laiks (s)]. 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 T_s (s)].

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

Breakers resistance R_{on} (Ohms):

[Kontaktu pretestība ieslēgta stāvoklī **R_{on}** (Ω)].

Snubbers resistance R_p (Ohm):

[Loka dzesēšanas ķēdes pretestība **R_p** (Ω)].

Snubbers capacitance C_p (F):

[Loka dzesēšanas ķēdes kapacitāte **C_p** (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).

Three-Phase Series RLC Branch	Virknē saslēgta trīsfāzu RLC ķēde
-------------------------------	-----------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: virknē saslēgt trīsfāzu RLC ķēdes bloku, kurš veido vienu pretestību, spoli, kondensatoru, vai arī to kombinācijas fāzēm *A*, *B* un *C*. Visiem parametriem var arī būt negatīvas vērtības.

Bloka parametri:

Resistance R (Ohms):

[Pretestība $R(\Omega)$]. Aktīvas pretestības vērtība. Izslēgt ķēdes pretestību var, piešķirot tai nulles vērtību. Šinī gadījuma rezistors netiks atspoguļots bloka piktogrammā.

Inductance L (H):

[Induktivitāte $L(H)$]. Induktivitātes vērtība. Izslēgt ķēdes induktivitāti var, piešķirot tai nulles vērtību. Šinī gadījuma spole netiks atspoguļota bloka piktogrammā.

Capacitance C (F):

[Kapacitāte $C(F)$]. Kapacitātes vērtība. Izslēgt ķēdes kapacitāti var, piešķirot tai bezgalības vērtību (inf). Šinī gadījuma kondensators netiks atspoguļots bloka piktogrammā.

Measurements:

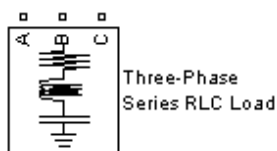
[Mērītie mainīgie]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Branch voltages* – ķēdes spriegumi,
- *Branch currents* – ķēdes strāvas,
- *Branch voltages and currents* – ķēdes spriegumi un strāvas.

Three-Phase Series RLC Load

Virknē saslēgta trīsfāzu RLC slodze

Piktogramma:



Uzdevums: virknē saslēgt trīsfāzu RLC slodzes bloku, kurš izveido trīsfāzu balansēto slodzi, ka saslēgto virknē RLC elementu kombināciju. Parametri tiek uzdoti, izmantojot ķēdes jaudu pie noteikta sprieguma un frekvences.

Bloka parametri:

Configuration:

[Konfigurācija]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *Y(grounded)* – zvaigzne ar sazemēto neitrāli,
- *Y(floating)* – zvaigzne bez nulles izvada,
- *Y(neutral)* – zvaigzne ar nulles izvadu,
- *Delta* – trīsstūris.

Nominal Voltage V_n (Vrms):

[Nominālais spriegums $V_n(V)$]. Esoša tīkla sprieguma vērtība, pie kuras tiek aprēķinātas elementu jaudas.

Nominal frequency f_n (Hz):

[Nomināla frekvence $f_n(H)$]. Esoša tīkla frekvences vērtība, pie kuras tiek aprēķinātas elementu jaudas.

Active power P (W):

[Aktīva jauda $P(W)$].

Inductive reactive power QL (positive VAR):

[Reaktīva induktivitātes jauda $QL(VAR)$]. Patērēta spolē reaktīva jauda. Norāda pozitīvo vērtību vai 0.

Capacitive reactive power QC (negative VAR):

[Reaktīva kapacitātes jauda $QC(VAR)$]. Patērēta kondensatorā reaktīva jauda. Norāda pozitīvo vērtību vai 0.

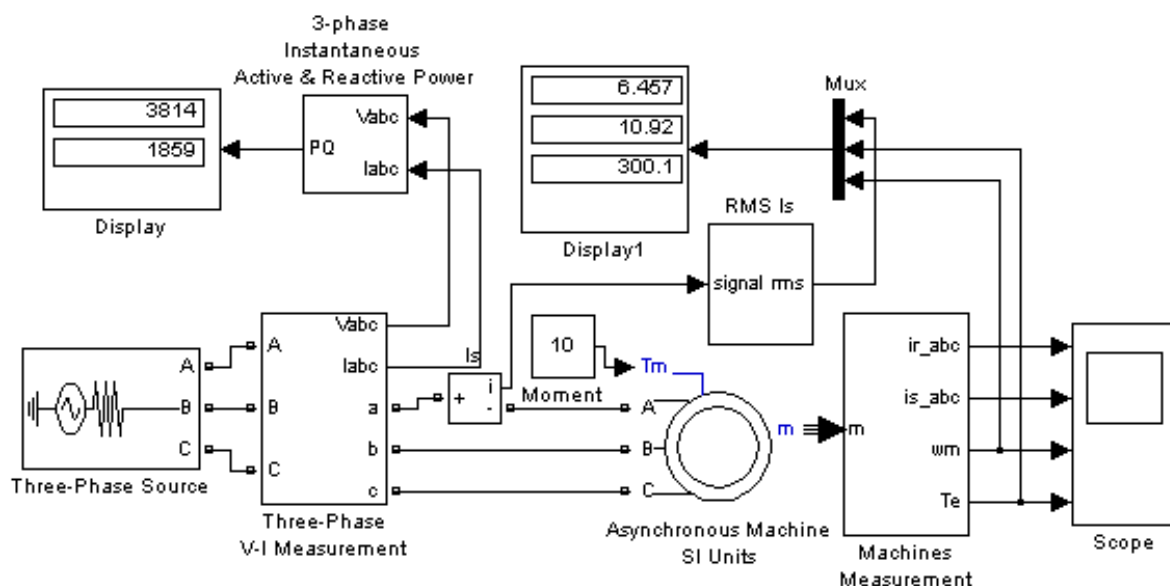
Measurements:

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

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Branch voltages* – ķēdes spriegumi,
- *Branch currents* – ķēdes strāvas,
- *Branch voltages and currents* – ķēdes spriegumi un strāvas.

2.2. Asinhronā dzinēja strukturāla modeļa izstrāde

Vispārīgais asinhronā dzinēja modelis ir parādīts zemāk (2.4.att.). Asinhronā dzinēja parametri tiek ņemti vai aprēķināti, balstoties uz dzinēja pasē norādītiem tehniskiem datiem. Aprēķina aizvietošanas shēmas parametrus (aktīvas pretestības un induktivitātes). Precīzs aizvietošanas shēmas parametru aprēķins izmantojot dzinēja tehniskus datus, ir sarežģīts uzdevums, jo tas ir saistīts ar nelineāro elementu aprēķinu. Tāpēc izmantota metodika nepretendē uz maksimāli iespējamo precizitāti.



2.4.att. Virtuālais modelis asinhronā dzinēja pētīšanai

Mašīnas parametru aprēķiniem tiek izmantoti sekojoši izejdati:

P_n - nomināla jauda [W],

$\cos\varphi$ - jaudas koeficients,

U_n - nominālais līnispriegums [V],

I_n - statora nomināla strāva [A],

f_1 - tīkla frekvence [Hz],

k_I - palaišanas strāvas kārtņība,

n_n - vārpstas griešanas nominālais ātrums [apgr/min],

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

m_p - palaišanas momenta kārtņība,

η - lietderības koeficients,

$m_{\max}$ - maksimāla momenta kārtņība,

p - polu pāru skaits.

Asinhronās mašīnas parametri tika aprēķināti pēc sekojošām izteiksmēm [1-4,9-14]:

Nominālais fāzes spriegums [V]:

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

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

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (2.24)$$

Nominālā slīde:

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} \quad (2.25)$$

Kritiskā slīde:

$$s_{kr} = s_n (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) \quad (2.26)$$

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

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \quad (2.27)$$

Nominālais leņķiskais vārpstas griešanas ātrums [rad/s]:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad (2.28)$$

Nominālais moments [N·m]:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2.29)$$

Maksimālais moments [N·m]:

$$M_{\max} = m_{\max} M_n \quad (2.30)$$

Palaišanas moments [N·m]:

$$M_p = m_p M_n \quad (2.31)$$

Mehāniskie zudumi [W]:

$$P_{meh} = (0.01 \div 0.05) P_n \quad (2.32)$$

Pielīdzināšanas koeficients (mazāka vērtība mašīnām ar lielāko jaudu):

$$C = (1.01 \div 1.05) \quad (2.33)$$

Pielīdzinātā rotora aktīva pretestība [Ω]:

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{P_n + P_{meh}}{I_n^2 \frac{1-s_n}{s_n}} \quad (2.34)$$

Statora aktīva pretestība [Ω]:

$$R_s = \frac{U \cos \varphi (1-\eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{meh}}{3I_n^2} \quad (2.35)$$

Pielīdzinātā statora un rotora noplūdes induktivitāte [H]:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi \cdot f_1 (1 + C^2) k_I I_n} \quad (2.36)$$

Statora induktivitāte [H]:

$$L_s = \frac{U}{2\pi \cdot f_1 I_n \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} - \frac{2}{3} \frac{2\pi \cdot f_1 M_{\max}}{pU} \frac{s_n}{s_{kr}}} \quad (2.37)$$

Magnētiskas ķēdes induktivitāte [H]:

$$L_m = L_s - L_{sp} \quad (2.38)$$

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

$$C1 = 1 + \frac{L_{sp}}{L_m} \quad (2.39)$$

koeficientu **C1** jāsalīdzina ar iepriekš pieņemto **C**. Pēc vajadzības aprēķinu var atkārtot, cenšoties panākt minimālo starpību starp **C** un **C1** [5-8,15].

2.3. Asinhronā dzinēja AHP90L2 palaišanas un stacionāra režīmu pētīšana

Kā pētīšanas objekts ir izvēlēts asinhronais dzinējs ar īsi saslēgto rotoru AHP90L2. Sērijās AHP asinhronie dzinēji tiek izmantoti dažādās iekārtās un mašīnās: kompresoros, ventilatoros, automātiskas vadību sistēmās u.t.t. AHP90L2 dzinēja tehniskie dati ir apkopoti zemāk (2.1.tabula):

2.1.tabula. AHP90L2 tehniskie dati

U_n [V]	f [Hz]	P_n [kW]	n_n [apgr/min]	η [%]	$\cos\varphi$	I_n [A]	m_p	$m_{\max}$	k_i	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*, nosaukums *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, rekomendējams 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-lietderības koeficients,cosfi-jaudas koeficients
In-nominala strava,ki-palaisanas stravas kartniba
mp-palaisanas momenta kartniba,mmax-maksimāla momenta kartniba
p-polu paru skaitu
Rezultati:
Rr-pielīdzināta rotora aktīva pretestība,
Rs-pielīdzināta statora aktīva pretestība,
Lsp-pielīdzināta statora(rotora)noņludes induktivitāte
Lm-magnetiskas ķedes induktivitāte
c un c1 pielīdzināšanas koeficienti

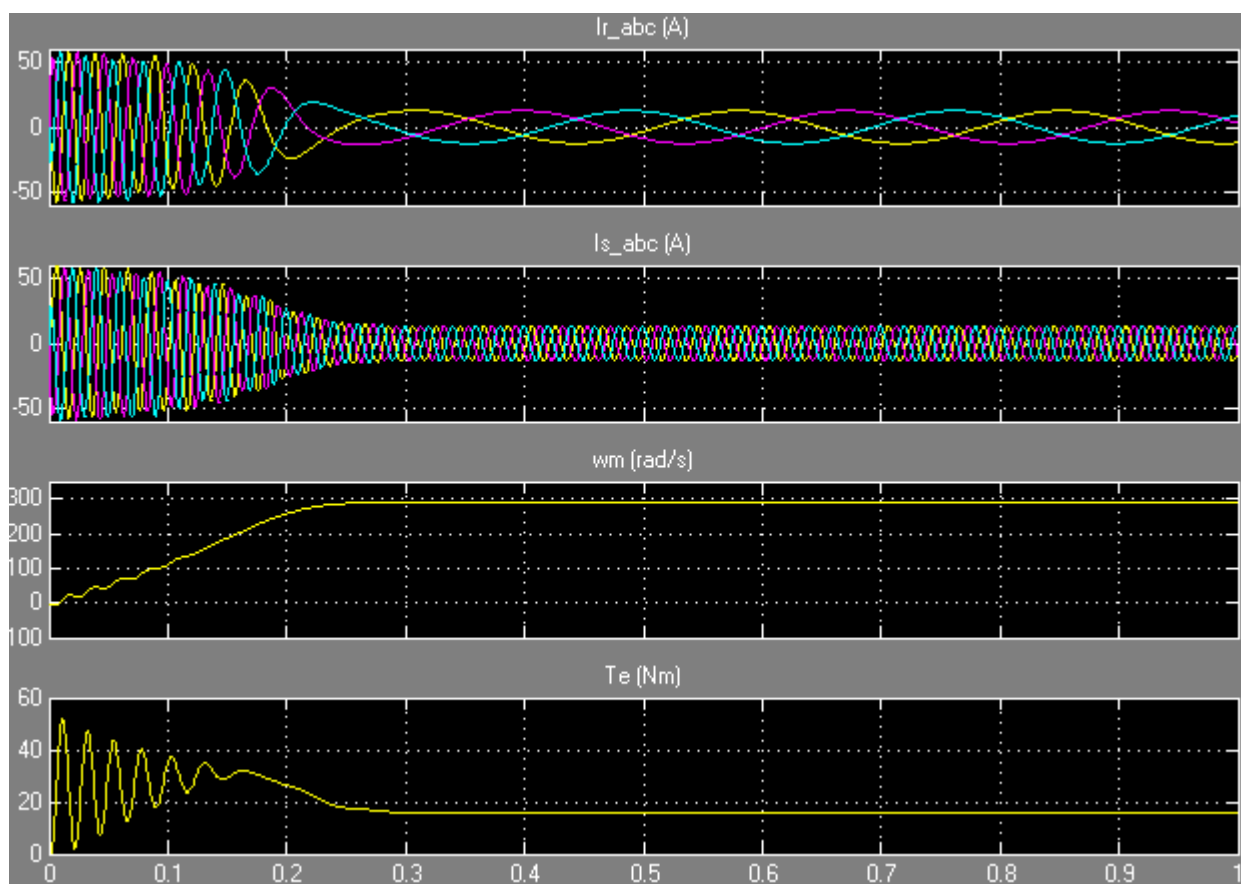
```

Ar faila *aprekins.m* palīdzību iegūtie rezultāti ir apkopoti zemāk (2.2.tabula):

2.2.tabula. Ar faila *aprekins.m* palīdzību iegūtie dati (AIP90L2)

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** (pieņemta un faktiskā pielīdzināšanas koeficienta) starpību, ievietoju datus asinhronās mašīnas blokā. Zemāk ir parādīti ar bloka Scope palīdzību iegūtie rezultāti, pie **Tm**=15 Nm (2.5.att.).



2.5.att. Asinhronā dzinēja AIP90L2 parametri pie $T_m=15 \text{ Nm}$ ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, w_m, T_e=f(t)$)

Grafikos atspoguļoti (secība no augšas uz leju): rotora tinumu strāvas (I_{r_abc}), statora tinumu strāvas (I_{s_abc}), rotora griešanas leņķiskais ātrums (w_m), elektromagnētiskais moments (T_e). Tie parāda asinhrona dzinēja AIP90L2 darbību palaišanas un stacionāra režīmos pie nemainīgas slodzes. No iegūtiem datiem (2.3.tab) var konstruēt situācijas prognozēšanas raksturlīknes.

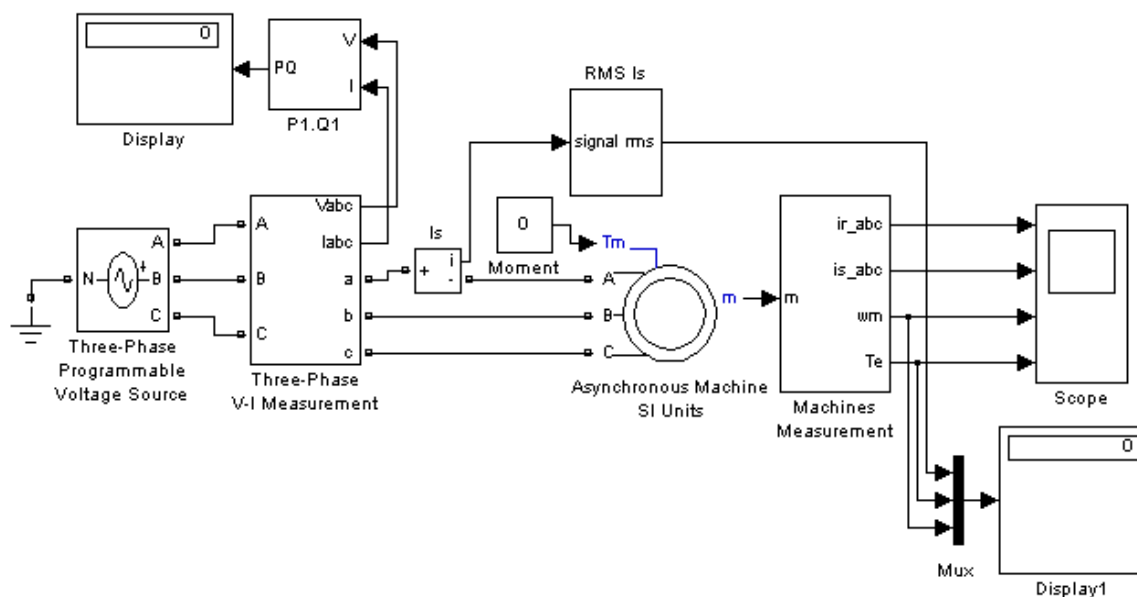
2.3.tabula. Eksperimentā iegūtie rezultāti

T_m [Nm]	T_e [Nm]	w_m [rad/s]	P [W]	Q [VAR]	I_s [A]	$I_{\text{palaišanas}}$ [A]	$t_{\text{palaišanas}}$ [s]
0	0.94	313.5	377.7	1879.0	2.92	40.80	0.13
5	5.92	307.3	2027.0	1817.0	4.13	41.07	0.18
10	10.90	299.9	3814.0	1859.0	6.44	41.32	0.20
15	15.87	290.9	5798.0	2052.0	9.36	41.56	0.26
20	20.83	279.2	8067.0	2466.0	12.86	41.77	0.43

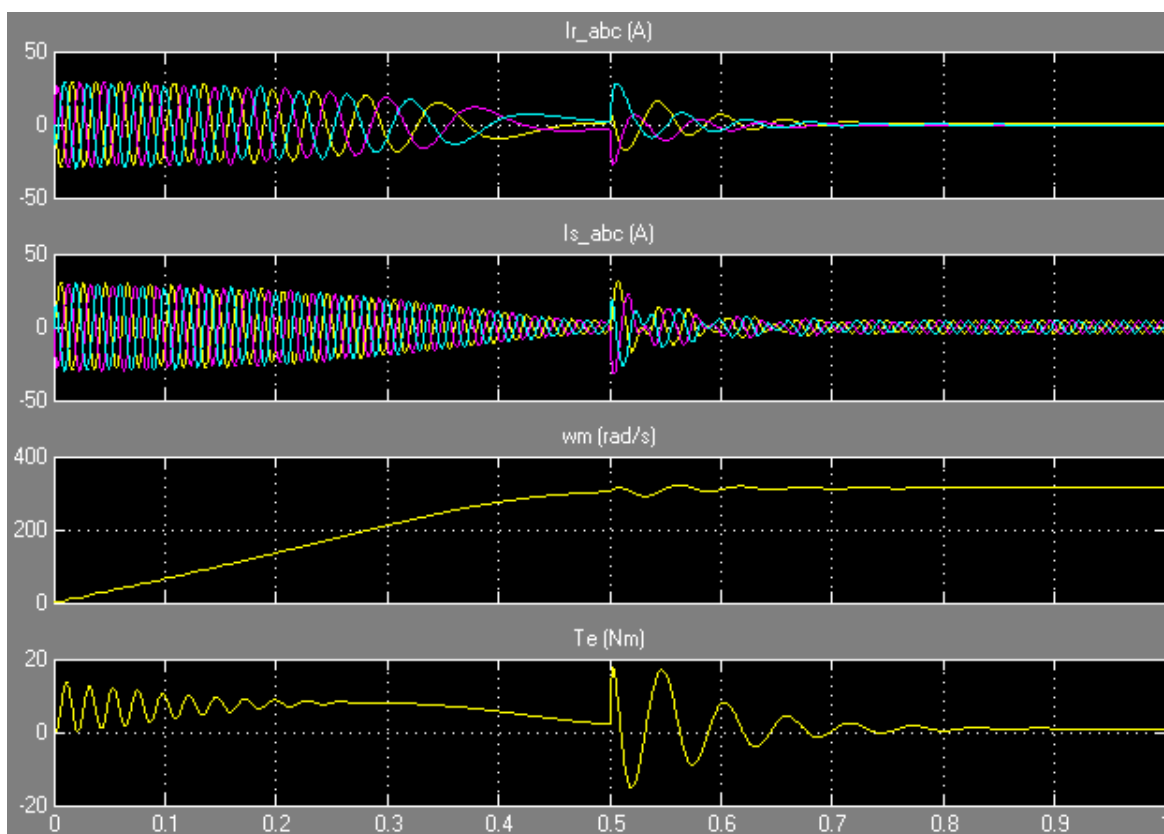
Asinhronā dzinēja virtuālo modeli (2.4.att.) ir izdevīgi izmantot, pētot dzinēja parametru izmaiņu pie dažādiem palaišanas apstākļiem.

2.4. Asinhronā dzinēja AIP90L2 palaišanas strāvas ierobežošana

Palaišanas strāvu ierobežo, samazinot palaišanas spriegumu. Izstrādātais modelis ļauj apskatīt asinhronā dzinēja palaišanu ar autotransformatoru (2.6.-2.7.att.).



2.6.att. Asinhronā dzinēja ar autotransformatoru palaišanas modelis



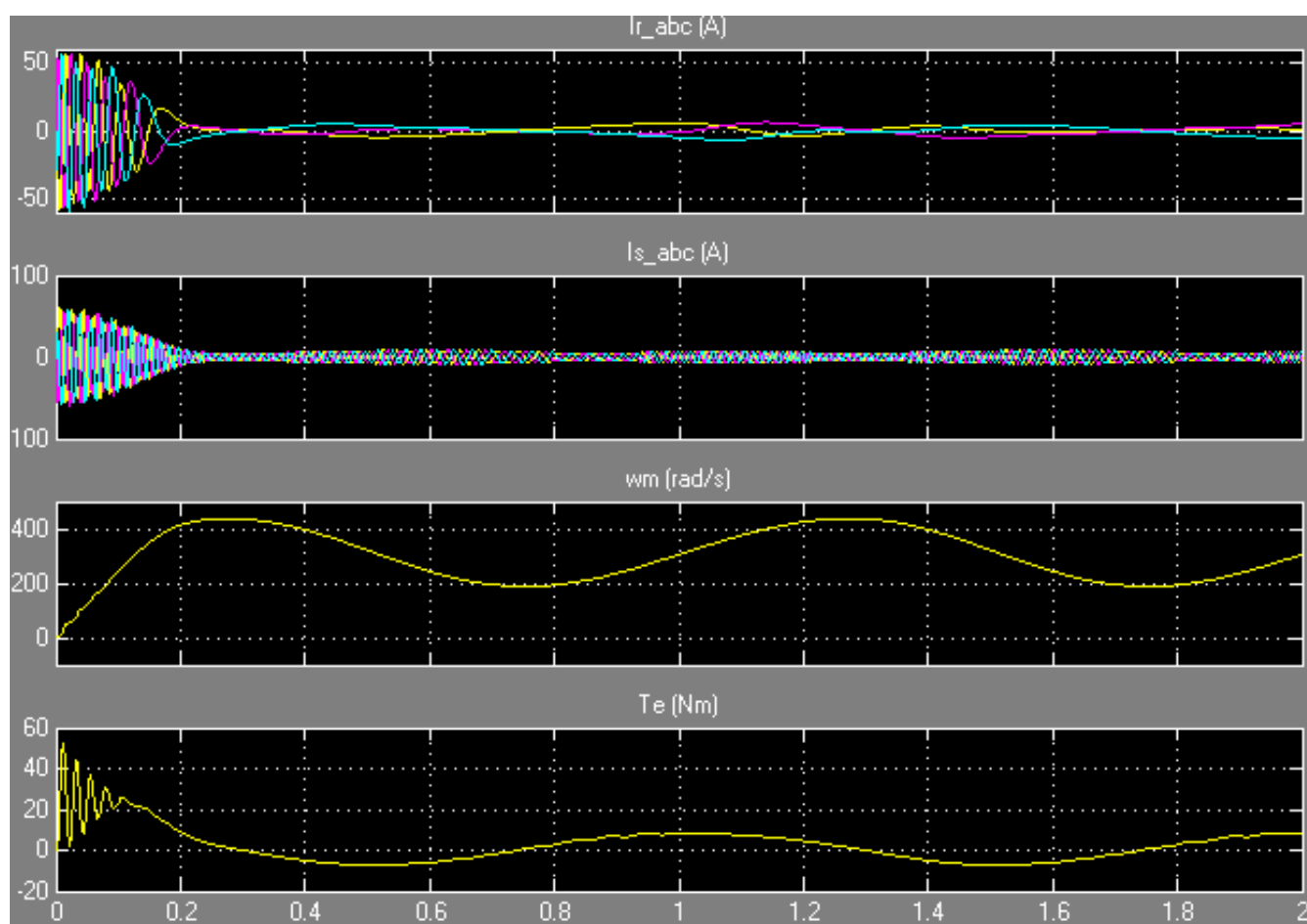
2.7.att. Asinhronā dzinēja palaišana ar autotransformatoru ($U=190$ V),
($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)

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 zemāk (2.4.tab):

2.4.tabula.Eksperimentā iegūtie rezultāti

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

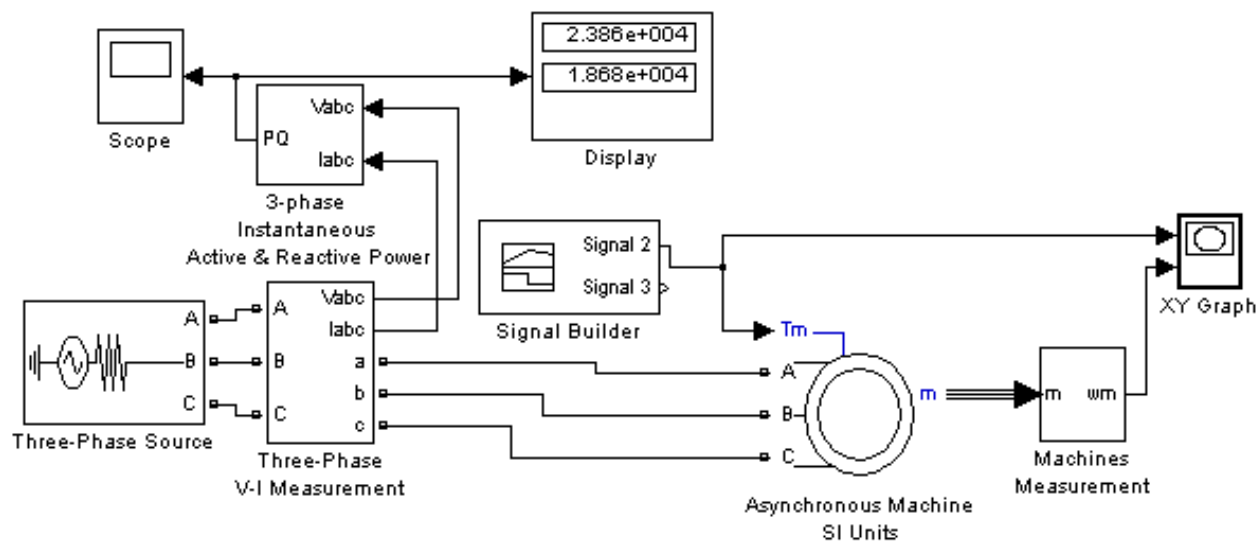
Izstrādātais modelis ļauj arī apskatīt rotora griešanas ātruma regulēšanu, mainot frekvences vērtību (2.8.att.). Frekvence svārstās 30-70 Hz robežās.



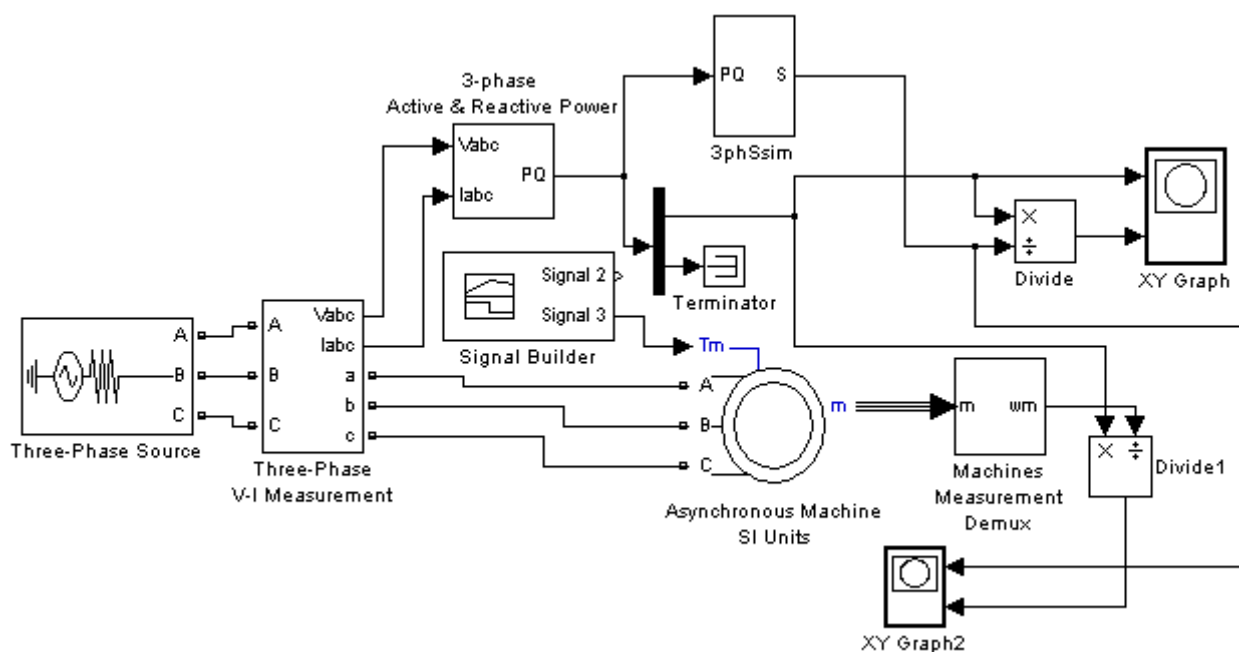
2.8.att. Rotora griešanas ātruma regulēšanā mainot frekvenci ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)

2.5. Asinhronā dzinēja AIP90L2 darba raksturlikņu veidošana

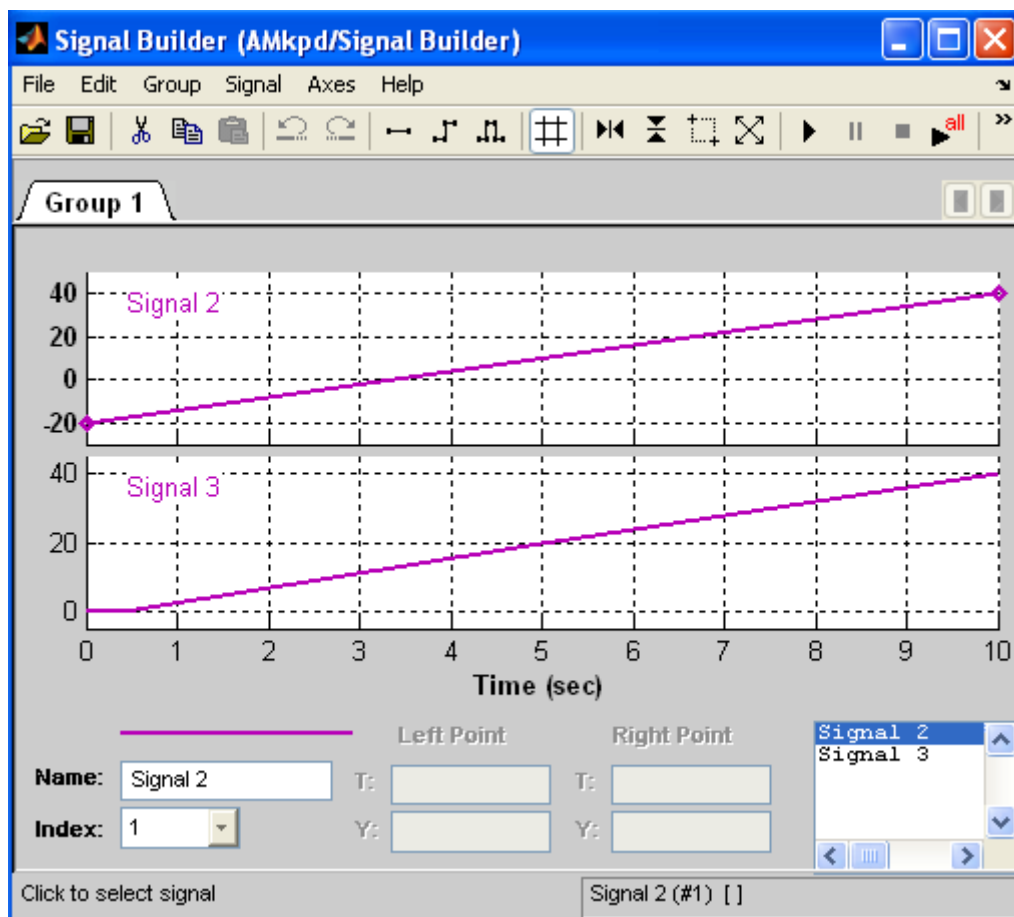
Lai raksturotu asinhronā dzinēja AIP90L2 darbību pie mainīgām slodzēm izveidoti sekojošie modeļi (2.9.-2.10.att.):



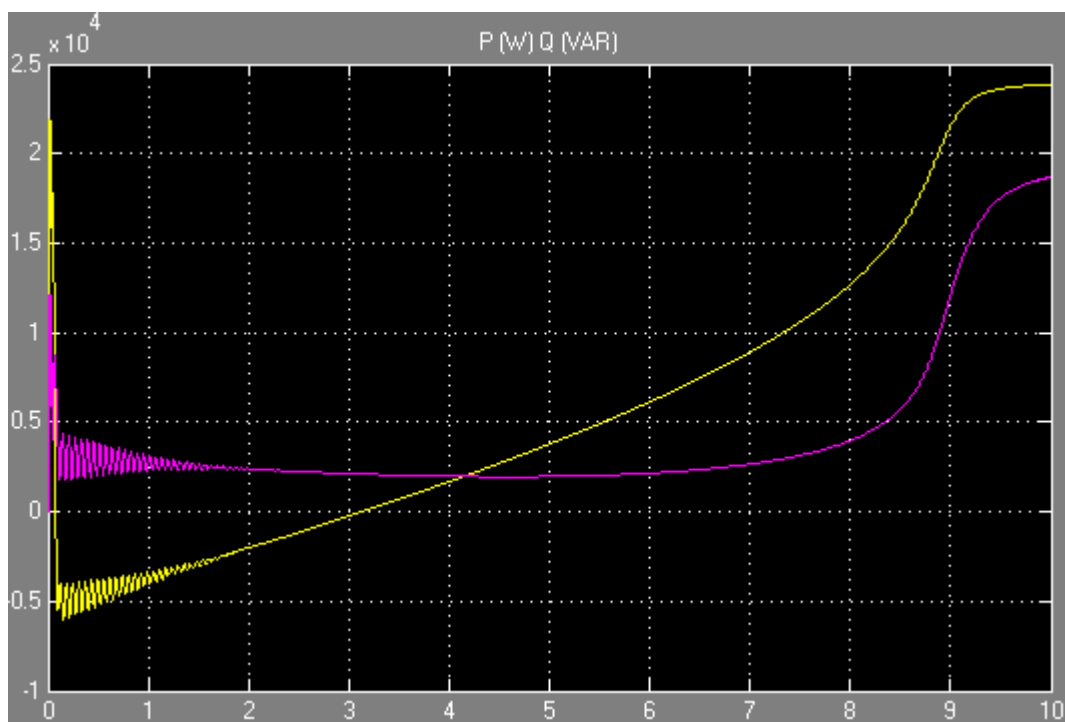
2.9.att. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlīknes konstruēšanas modelis ($w_m = f(T_m)$)



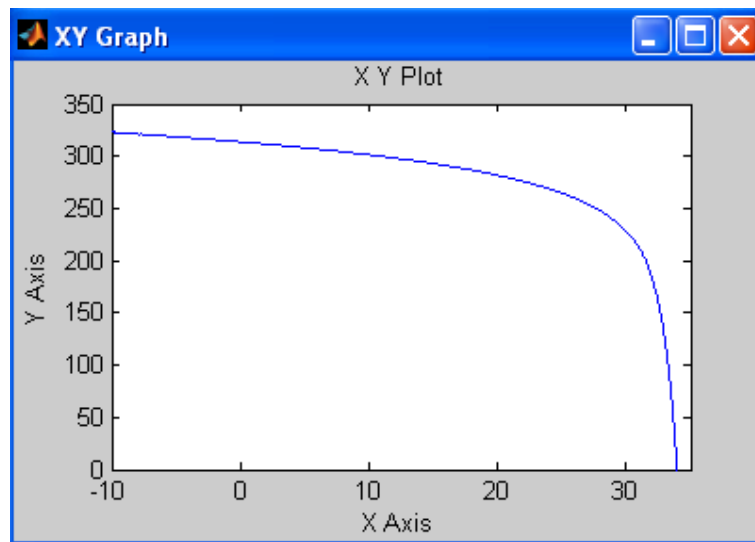
2.10.att. Asinhronā dzinēja darba raksturlikņu konstruēšanas modelis ($\cos\varphi, M = f(S)$)



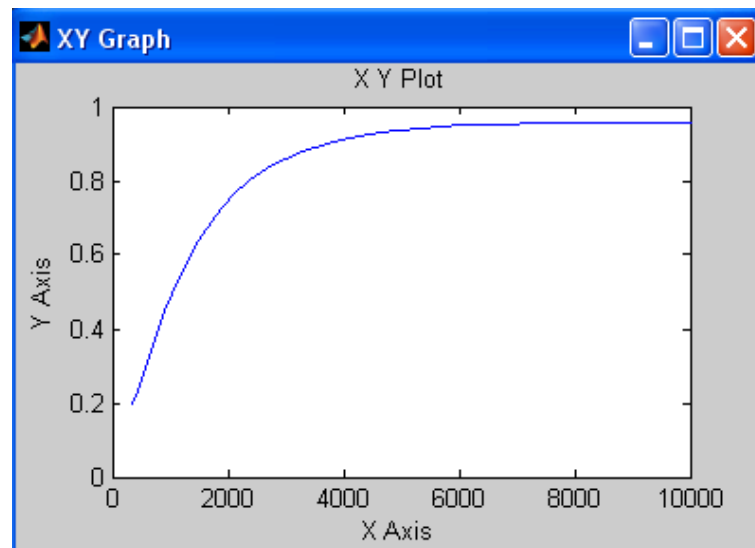
2.11.att. Vārpstas kustības pretošanās momenta (T_m) signāla izmaiņa



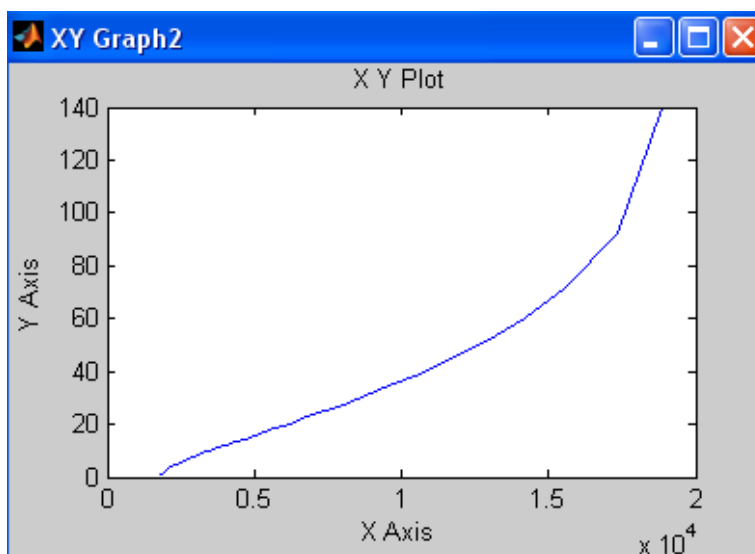
2.12.att. Aktīvās un reaktīvās enerģijas izmaiņa



a)



b)



c)

2.13.att. Raksturlīknes: a) $w_m=f(T_m)$ b) $\cos\varphi=f(S)$ c) $M=f(S)$

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

Izmantojot izstrādātus modeļus, šo procesu var vienkāršot. Bloks *Signal builder* ļauj virtuāli noslogot dzinēju, vienmērīgi palielinot vārpstas kustības pretošanās momentu (T_m). Konstruētas raksturlīknes parādītas attēlā 2.13.:

- a) rotora leņķiska ātruma vērtības atkarība no vārpstas kustības pretošanās momenta izmaiņas $\omega_m = f(T_m)$,
- b) jaudas koeficienta vērtības atkarība no dzinēja patērētas jaudas izmaiņas $\cos\varphi = f(S)$,
- c) griezes momenta vērtības atkarība no dzinēja patērētas jaudas izmaiņas $M = f(S)$.

Jaudas koeficienta ($\cos\varphi$) un griezes momenta (M) vērtībās tiek aprēķinātas pēc sekojošiem izteiksmēm [1-4,9-14]:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (2.40)$$

$$M = \frac{P}{\omega_m} \quad (2.41)$$

kur:

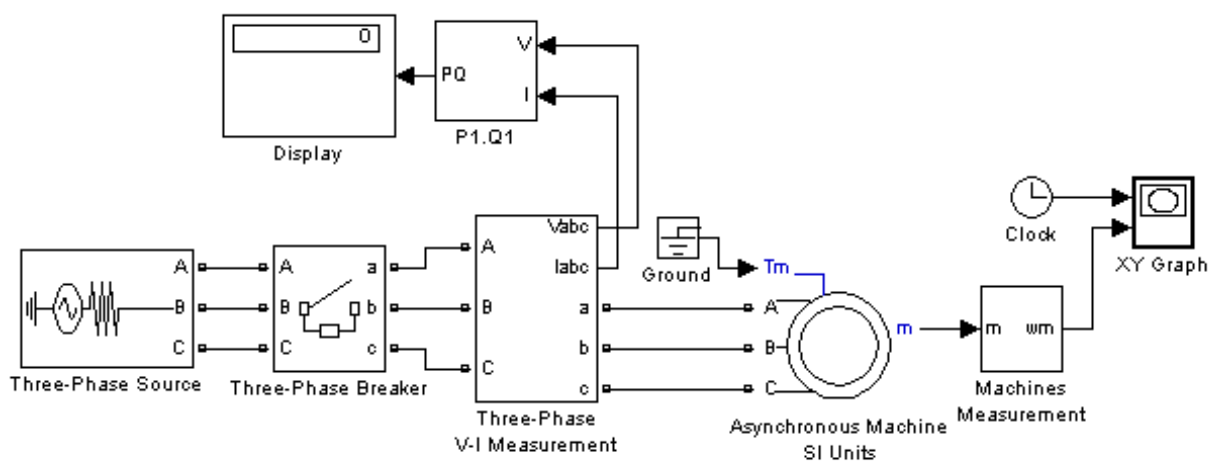
P - aktīva jauda (W),

S - pilna jauda (W),

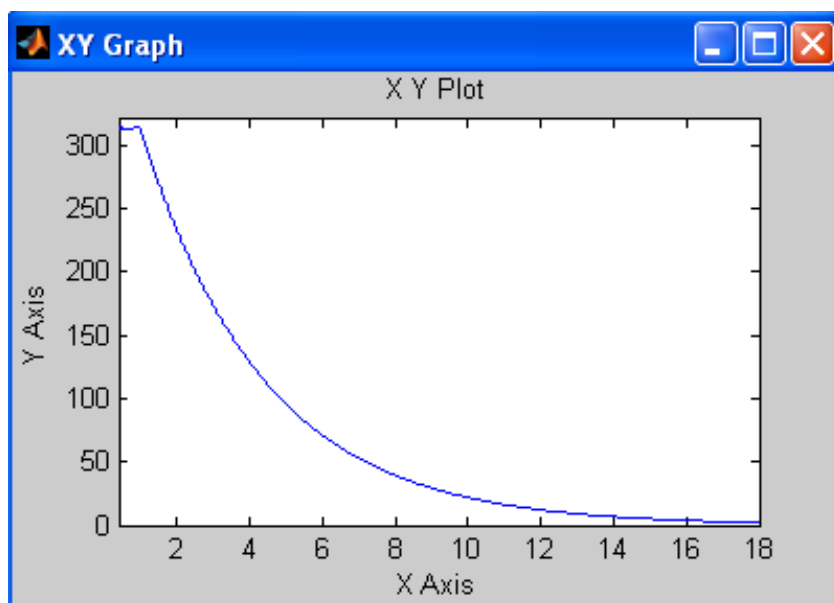
ω_m - rotora leņķiskais ātrums [rad/s].

2.6. Asinhronā dzinēja АИР90L2 bremzēšanas laika pētīšana

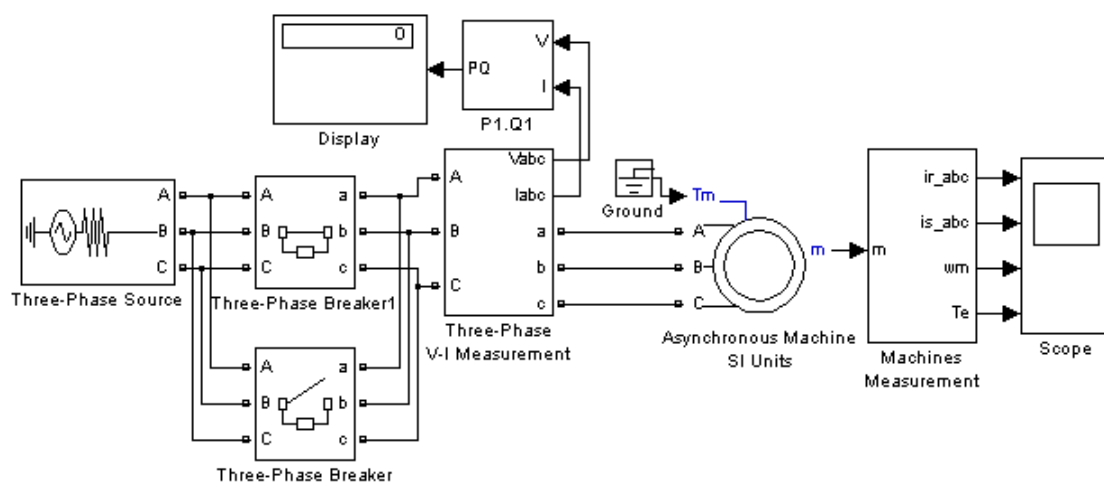
Elektropiedziņas modelēšanā sastopami uzdevumi, kuros ir nepieciešams zināt elektrodzinēja bremzēšanas un izskrējās parametrus. Lai tos noteikt ir izveidoti sekojošie modeļi (2.14.,2.16.att.):



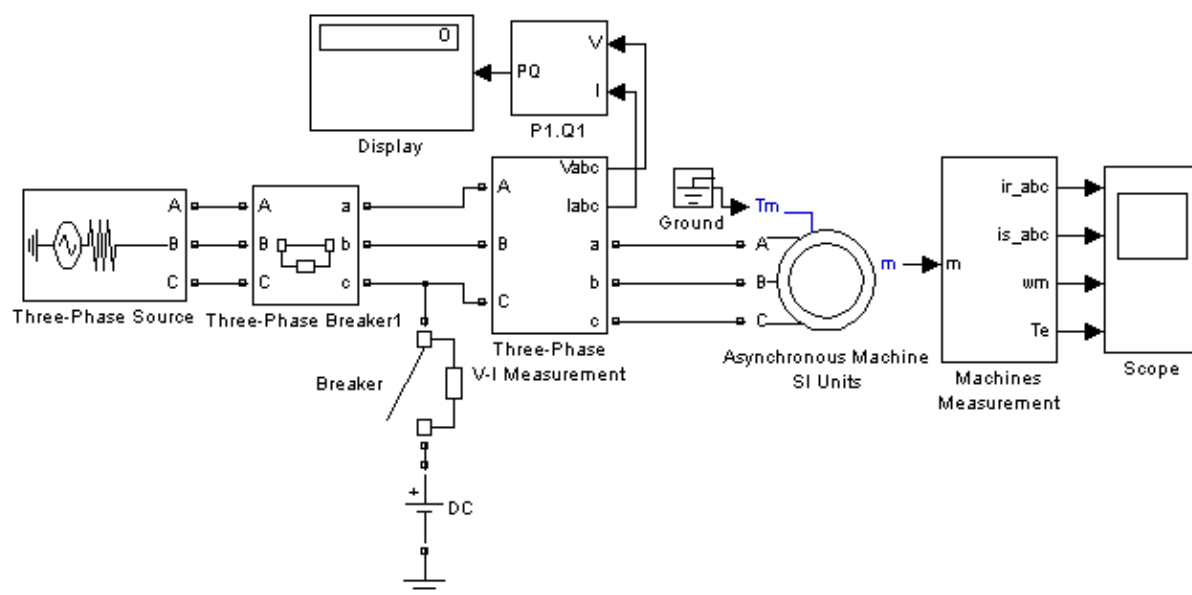
2.14.att. Asinhronā dzinēja izskrējās raksturlīknes konstruēšanas modelis ($w_m=f(t)$)



2.15.att. Asinhronā dzinēja izskrējās raksturlīkne ($w_m=f(t)$)

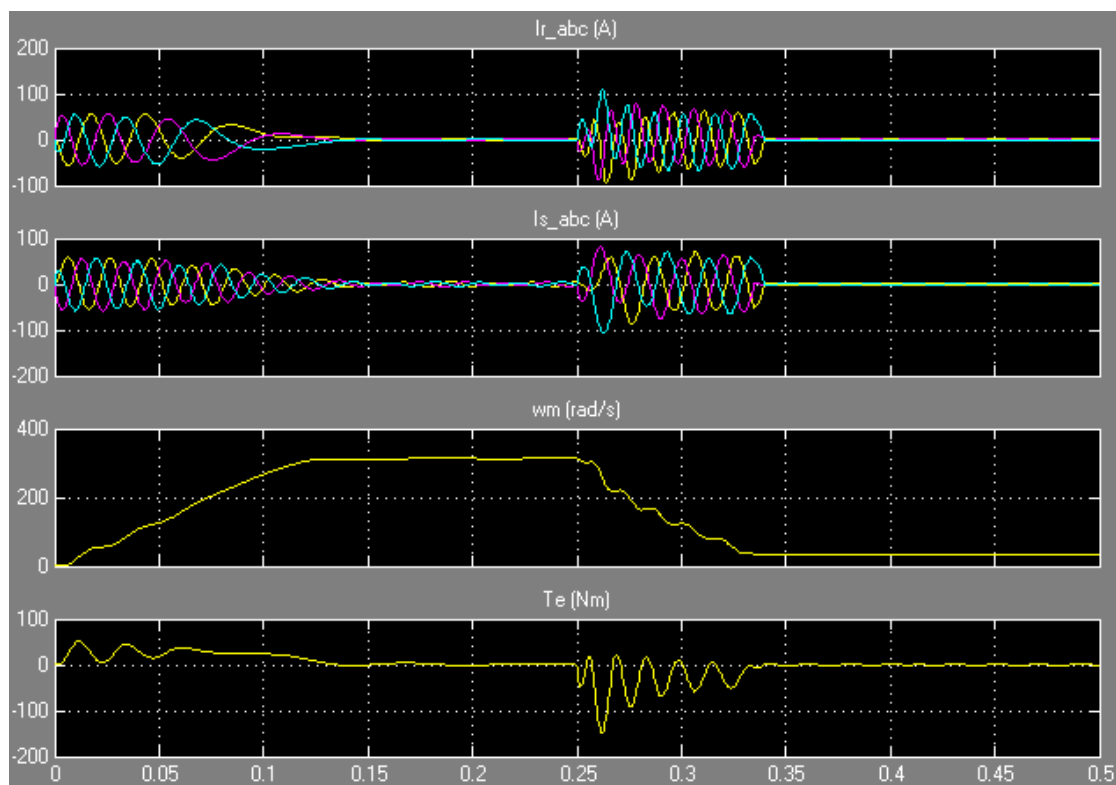


a) bremzēšana mainot rotora griešanas virzienu

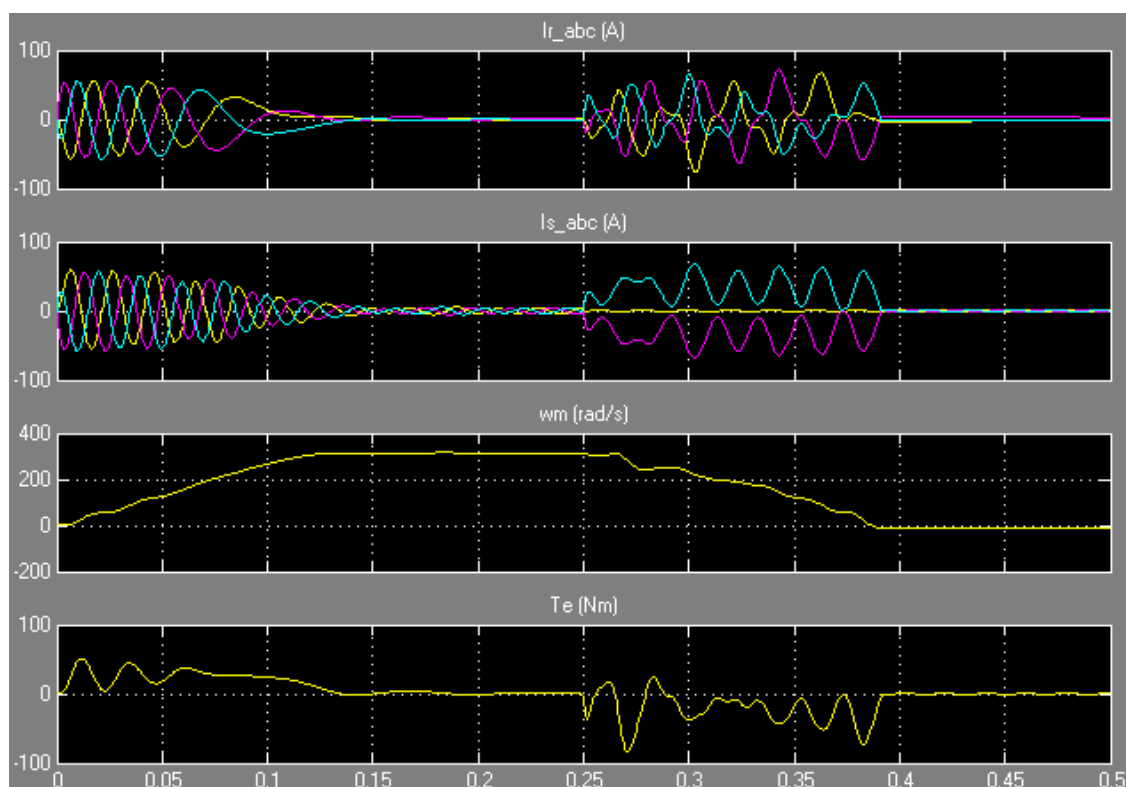


b) bremsēšana ar līdzstrāvu

2.16.att. Asinhronā dzinēja bremsēšanas modeļi



2.17.att. Asinhronā dzinēja bremsēšana mainot rotora griešanas virzienu
($I_{r_abc}, I_{s_abc}, w_m, T_e = f(t)$)



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

Izstrādātie modeļi ļauj izpētīt asinhronā dzinēja bremzēšanas laikus pie dažādām slodzēm un dažādām bremzēšanas metodēm, iegūtie rezultāti parādīti zemāk (2.5.tab).

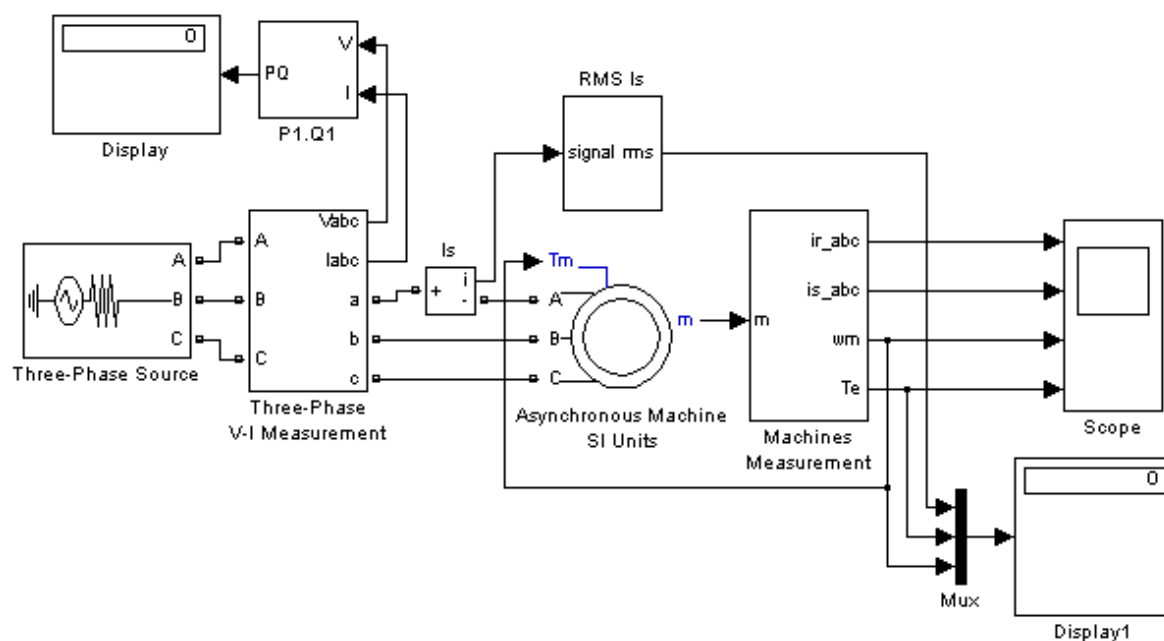
2.5.tabula. Eksperimentā noteikts bremzēšanās laiks

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

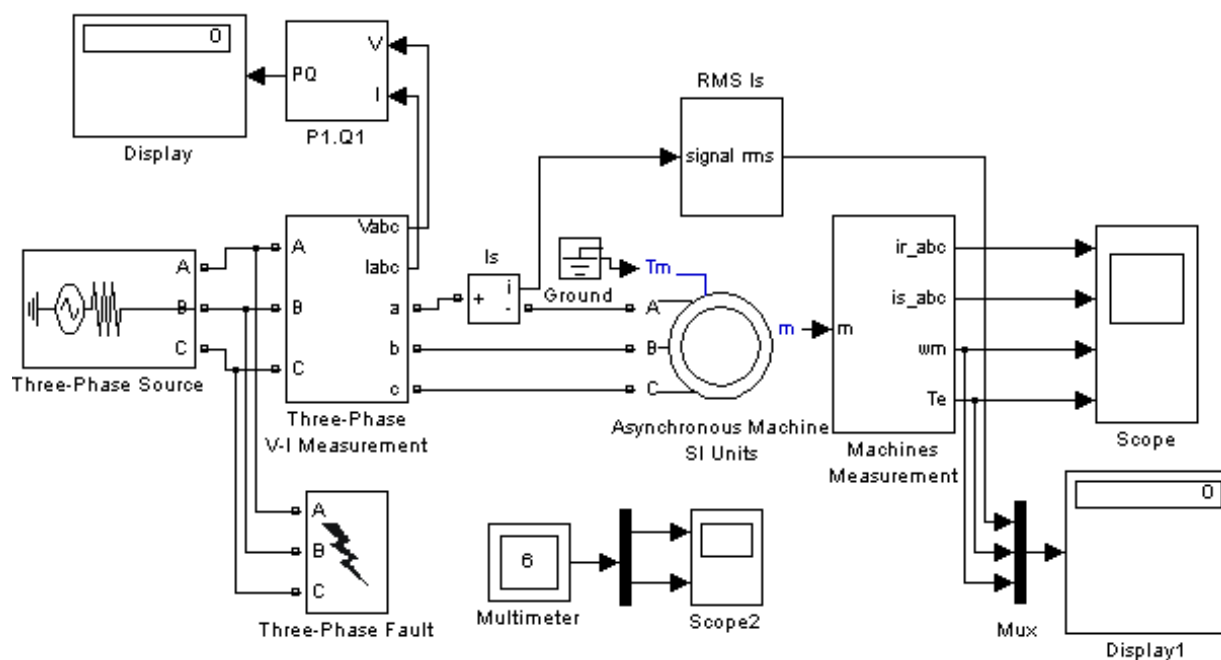
Var secināt, ka bremzēšana, mainot elektromagnētiska lauka griešanas virzienu, ir efektīvāka, tomēr bremzēšana ar līdzstrāvu ir laidenāka, kas samazina mehānisko triecienu.

2.7. Īsslēgumu ietekmes uz asinhronā dzinēja darbību pētīšana

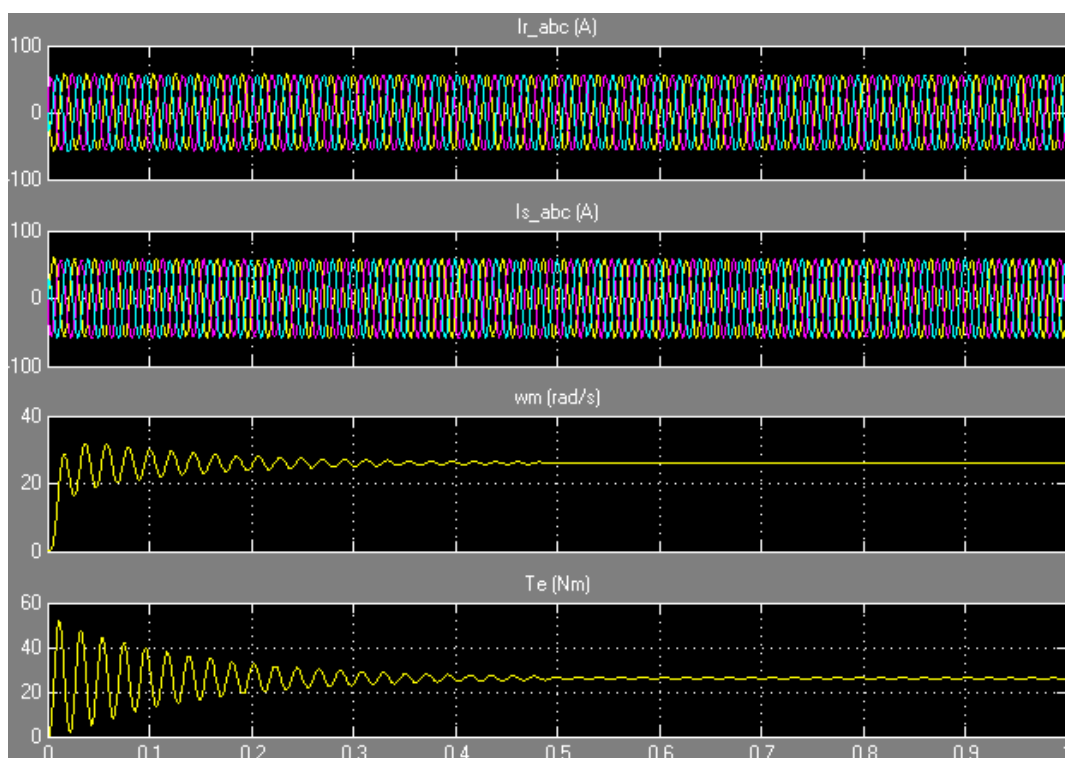
Lai apskatītu īsslēgumu ietekmes uz asinhronā dzinēja darbību, tika izstrādāti zemāk parādīti modeļi (2.19.-2.20.att.).



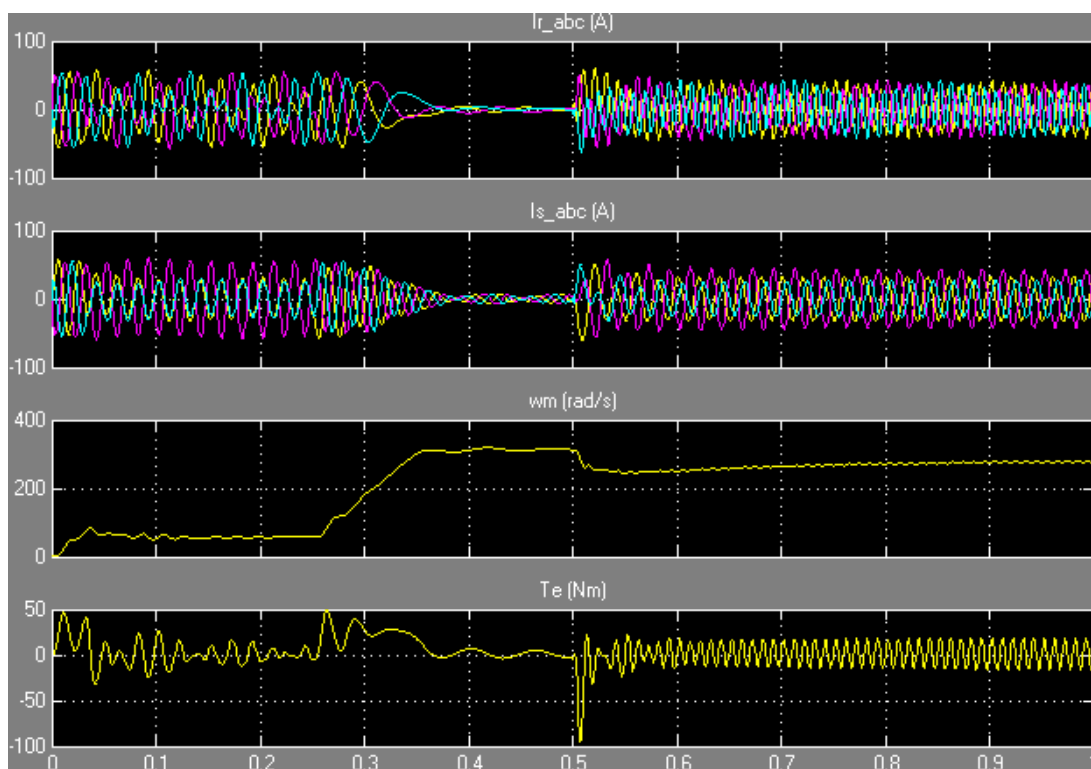
2.19.att. Starptinumu īssavienojuma moments



2.20.att. Tīkla īsslēgumu influences uz asinhrona dzinēja darbību pētīšanas modelis



2.21.att. Starptinumu ģissavienojuma moments ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)



2.22.att. A un C fāzes savstarpējais ģisslēgums ($I_{r_abc}, I_{s_abc}, \omega_m, T_e = f(t)$)

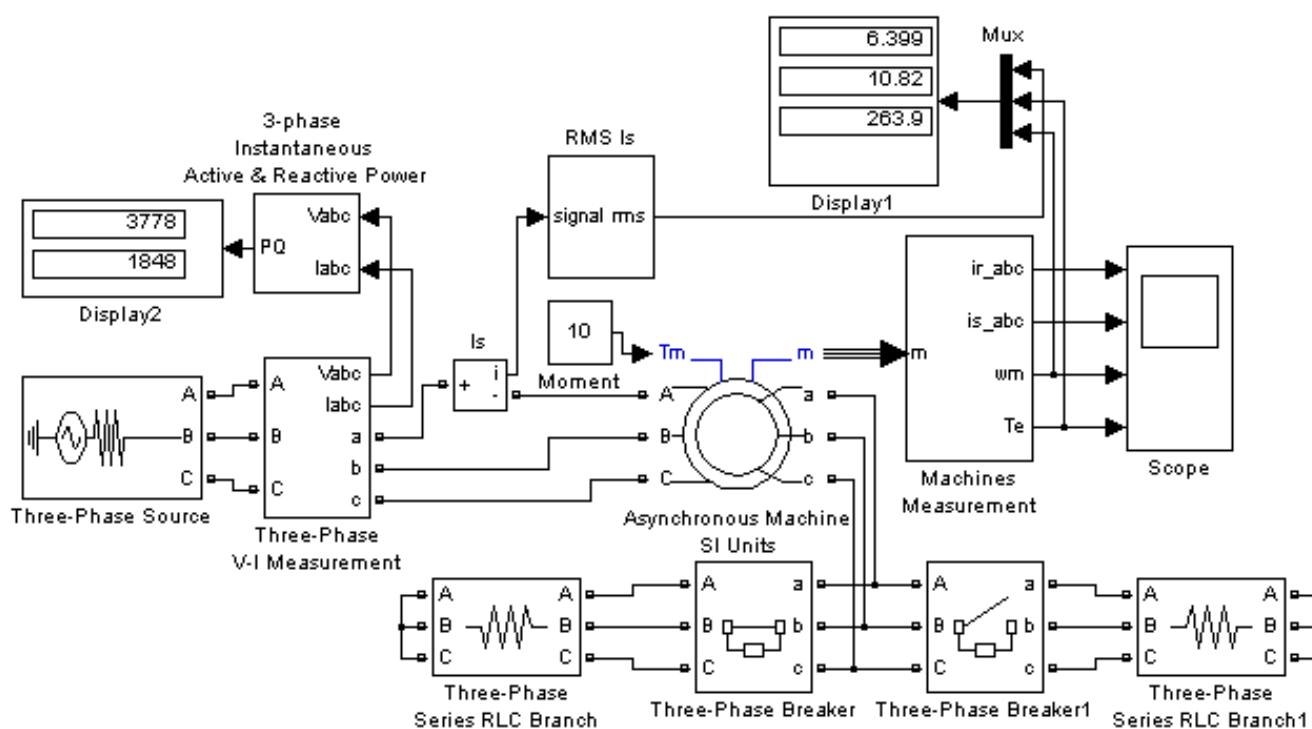
Izstrādātas shēmas ļauj pētīt dažādu veidu ģisslēgumu (starpfāzu, starptinumu, zemes slēgumu) influenci uz dzinējā notiekošiem procesiem. Starptinumu ģissavienojuma momenta noņemšanai ir izmantots modelis, kurā elektromagnētiskais moments tiek padots uz mašīnas

mehānisko ieeju. Īssavienojuma ietekmē statora un rotora tinumos palielinās strāvas un pazūd griezes moments, tā ilglaicīga iedarbība pieved pie dzinēja sadegšanas (2.21.att.).

Tīkla īsslēgumu un zemes slēgumu modelēšanai ir izmantots bloks *Three-Phase Fault*. Starpfāzu īsslēguma gadījumā vienāds līnijas spriegums tiek padots uz dzinēja divām fāzēm, trešajā tas paliek normāls. Amplitūdas nesimetriskums ir maz ievērojams, tomēr fāzu nesimetriskums pieved pie pastāvīgas magnētiska lauka griešanas virziena izmaiņas, izraisot dzinēja pārkarsi (2.22.att.).

2.8. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru palaišanas un stacionāra režīmu pētīšana

Asinhronās mašīnas ar fāzu rotoru modelēšanai tika paņemti asinhronā dzinēja AHP90L2 tehniskie dati. Tādā veidā pēc iegūtiem rezultātiem ir labāk saredzama starpība starp dažāda izpildījuma dzinējiem ar vienādu elektrisko un mehānisko parametru vērtībām. Izstrādāts asinhrona dzinēja ar fāzu rotoru pētīšanas modelis ir parādīts zemāk (2.23.att.).



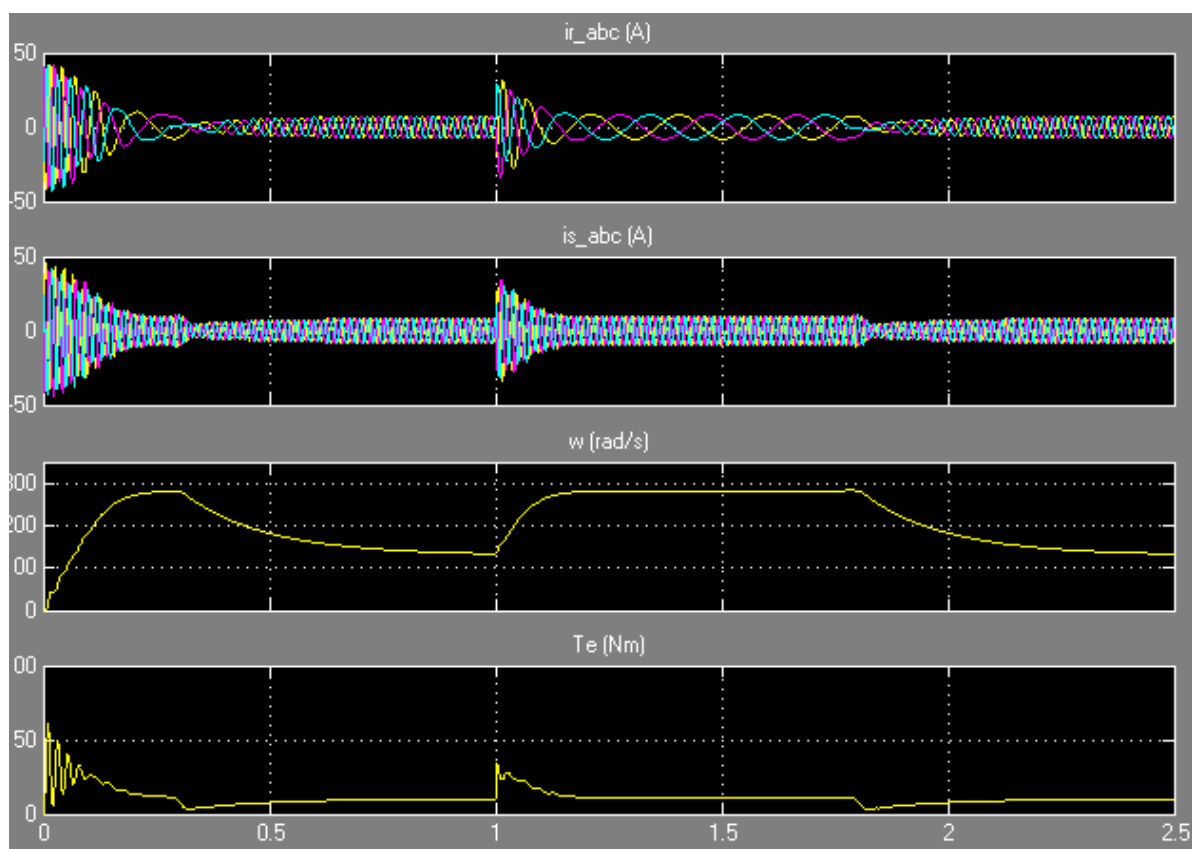
2.23.att. Asinhrona dzinēja ar fāzu rotoru pētīšanas modelis

Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru pirmā galvenā atšķirība no īsi saslēgta rotora asinhronas mašīnas ir sekojoša: fāzu rotora dzinējs tiek palaists ar palaišanas reostata palīdzību, kas tiek pieslēgts pie rotora tinumiem. Pirms rotora palaišanas reostata pretestība tiek uzstādīta līdz

maksimālai vērtībai, palaišanas laikā pretestības vērtība pakāpeniski tiek samazināta un beigas saslēgta īsi.

Otra īpašība ir tas, kā ar rotora tinumu aktīvas pretestības izmaiņu (pieaugumu), dzinēja darbības laikā, pieaug arī slīdes s vērtība, atbilstoši pieliktam griešanas momentam M . Tāda veida ar aktīvas pretestības rotora tinumos ieviešanās ir panākta asinhrona dzinēja rotora griešanas ātruma regulēšana.

Asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru modelis ļauj apskatīt arī rotora griešanas ātrumu izmaiņu atkarība no pieslēgtas pie tā aktīvas pretestības. Zemāk ir parādīts simulācijas rezultāts pie $T_m=10$ Nm, ja pretestības vērtība svārstās no 2 līdz 20 omiem (2.24.att.).



2.24.att. Rotora griešanas ātruma regulēšana mainot pretestību ($i_{r_abc}, i_{s_abc}, w, T_e=f(t)$)

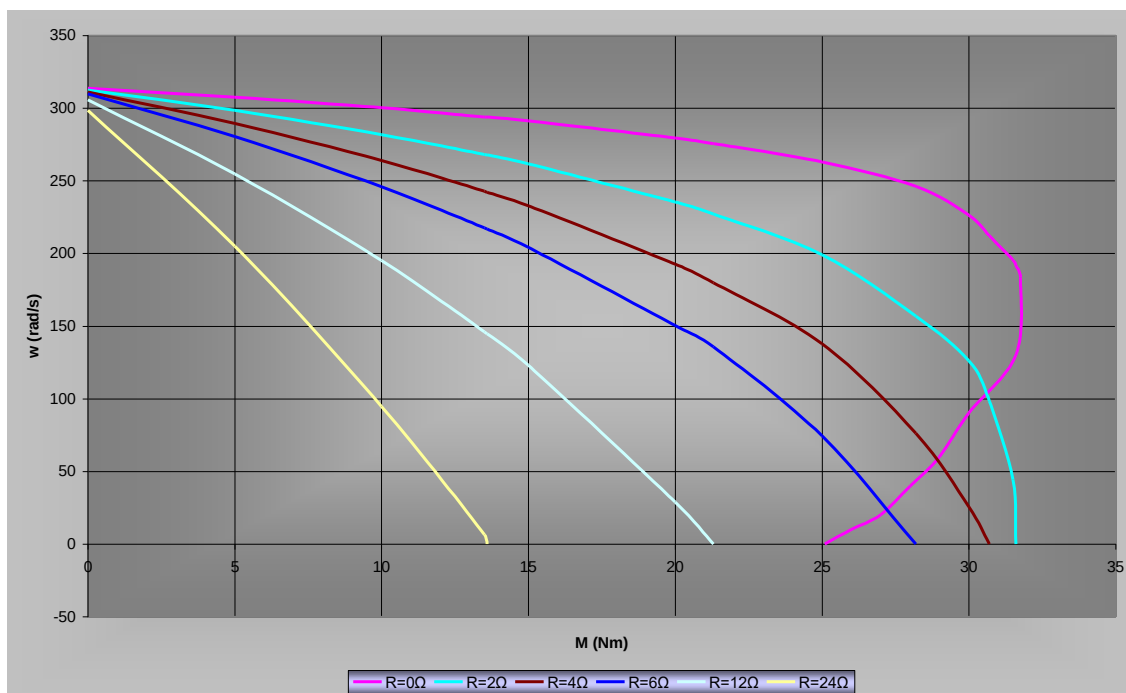
Zemāk, tabulā 2.6. ir apkopoti eksperimenta iegūtie rezultāti. Eksperimenta laikā tika mainīts rotora kustības pretošanās moments T_m un rotoram pieslēgta aktīva pretestība R .

2.6.tabula. Eksperimentā iegūtie rezultāti

R [Ω]	T_m [Nm]	T_e [Nm]	w_m [rad/s]	P [W]	Q [VAR]	I_s [A]	I_{palaišanas} [A]	t_{palaišanas} [s]
0	0	0.93	313.7	368.9	1869.0	2.90	40.78	0.13
0	5	5.88	307.5	2005.0	1804.0	4.12	41.05	0.16

0	10	10.84	300.2	3782.0	1846.0	6.43	41.31	0.20
0	15	15.79	291.2	5754.0	2038.0	9.33	41.54	0.24
0	20	20.73	279.4	8004.0	2444.0	12.82	41.76	0.43
0	25	25.68	262.9	10760.0	3237.0	17.22	41.95	1.42
2	0	0.96	312.3	378.6	1872.0	2.90	29.54	0.16
2	5	5.92	298.4	2020.0	1808.0	4.12	29.84	0.19
2	10	10.86	281.8	3793.0	1850.0	6.42	30.14	0.25
2	15	15.80	261.7	5764.0	2041.0	9.32	30.42	0.31
2	20	20.73	235.5	8009.0	2446.0	12.79	30.69	0.43
2	25	25.44	199.1	10610.0	3175.0	17.00	30.95	0.98
2	30	30.22	126.2	14490.0	4867	23.53	31.19	1.45
2	31.5	31.64	44.35	17410.0	6717	28.72	31.26	10.12
4	0	0.96	311.0	379.9	1877.0	2.90	23.25	0.20
4	5	5.90	289.4	2011.0	1805.0	4.10	23.52	0.26
4	10	10.82	263.9	3778.0	1848.0	6.40	23.78	0.31
4	15	15.71	232.7	5722.0	2033.0	9.26	24.03	0.39
4	20	20.59	192.6	7935.0	2428.0	12.67	24.27	0.49
4	25	25.23	137.7	10480.0	3133.0	16.81	24.50	1.08
4	30	30.07	25.77	14360.0	4799.0	23.25	24.73	1.62
6	0	0.96	309.7	379.9	1868.0	2.90	19.28	0.28
6	5	5.87	280.4	1999.0	1803.0	4.09	19.51	0.35
6	10	10.76	246.0	3758.0	1845.0	6.37	19.72	0.42
6	15	15.63	204.2	5692.0	2028.0	9.21	19.94	0.46
6	20	20.47	150.3	7883.0	2414.0	12.59	20.05	0.60
6	25	25.22	74.36	10480.0	3132.0	16.75	20.36	1.18
12	0	0.95	305.7	374.8	1866.0	2.89	13.04	0.40
12	5	5.73	254.6	1950.0	1801.0	4.05	13.19	0.51
12	10	10.50	195.1	3659.0	1837.0	6.23	13.33	0.66
12	15	15.25	123.0	5532.0	2005.0	9.01	13.48	0.89
12	20	20.08	28.92	7694.0	2373.0	12.31	13.62	1.17
24	0	0.89	298.5	354.3	1867.0	2.90	8.51	0.59
24	5	5.57	205.0	1897.0	1801.0	4.00	8.58	0.76
24	10	10.29	94.79	3578.0	1832.0	6.13	8.66	1.26
24	13.5	13.52	6.37	4826.0	1926.0	7.92	8.72	2.03

Palielinot rotora tinumam pieslēgtas aktīvas pretestības vērtību, tiek būtiski samazinātas palaišanas strāvas, nedaudz palielinot palaišanas laiku. Ir redzams, ka palaišanas moments, līdz noteiktam pretestības lielumam palielinās un pēc, atkal sāk kristies. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru mehāniskās raksturlīknes ir parādītas zemāk (2.25.att.). Augstāka no tiem atbilst nulles pretestībai un to sauc par dabīgo dzinēja mehānisko raksturlīkni, visas pārējās raksturlīknes ir mākslīgas. Ar aktīvas pretestības vērtības pieaugumu tie nobīdās uz leju.



2.25.att. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru mehāniskās raksturlīknes ($w_m=f(M)$)

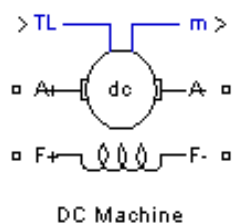
Pēc iegūtām raksturlīknēm ir redzams, kā asinhronam dzinējam ar fāzu rotoru pie noteiktam aktīvas pretestības vērtībām ir lielāks palaišanas moments nekā asinhronam dzinējam ar īsi saslēgto rotoru.

3. Līdzstrāvas dzinēja modelēšana

3.1. Izmantoto bloku bibliotēka

DC Machine	Līdzstrāvas mašīna
------------	--------------------

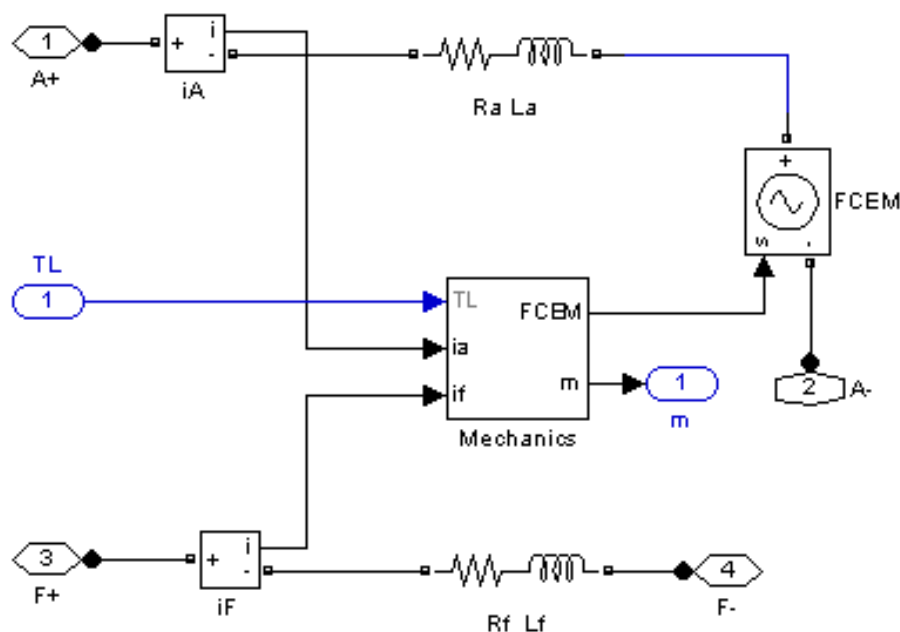
Piktogramma:



Uzdevums:

Modelē līdzstrāvas mašīnu dzinēja vai ģeneratora režīmus. Darba režīms tiek apzīmēts ar mašīnas elektromagnētiskā momenta zīmi: pozitīvo vai negatīvo.

Ierosmes tinuma pieslēgšanai ir paredzēti porti ($F+$, $F-$), tādējādi līdzstrāvas mašīnas modeļi var tikt pieslēgti gan paralēli, gan virknē. Vārpstās kustības pretošanās moments (slodze) tiek padots uz modeļa ievada portu T_L . Izejas portā m veidojas vektoru signāls, kas sastāv no četriem elementiem: ātruma, enkura strāvas, ierosmes strāvas un mašīnas elektromagnētiskā momenta.



3.1.att. Enkura un ierosmēs tinumu shēma

Enkura tinums ($A+$, $A-$) sastāv no spoles L_a un pretestības R_a , kuri ir savienoti virknē ar enkura inducēto elektrodzinējspēku E . Pēc formulas ir redzams, kā E ir proporcionāls mašīnas rotora griešanas ātrumam:

$$E = K_E \omega \quad (3.1)$$

kur:

K_E - sprieguma konstante,

ω - vārpstas rotēšanas ātrums.

Neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas mašīnās sprieguma konstante K_E ir proporcionāla enkura strāvai I_f :

$$K_E = L_{af} \cdot I_f \quad (3.2)$$

kur:

L_{af} - ierosmēs-enkura tinumu kopēja induktivitāte.

Elektromehāniskais elektrodzinējspēks, kuru izstrādā līdzstrāvas mašīna, ir proporcionāls enkura strāvai I_a :

$$T_E = K_T \cdot I_a \quad (3.3)$$

kur:

K_T - slodzes konstante.

T_e un T_L zīmju konvencija ir sekojoša:

$$T_E T_L > 0 : \text{dzinēja režīms}$$

$$T_E T_L < 0 : \text{ģeneratora režīms}$$

Slodzēs konstante ir vienāda ar sprieguma konstanti:

$$K_T = K_E \quad (3.4)$$

Enkura tinums tiek pievienots starp līdzstrāvas mašīnas **A+** un **A-** portiem. To izveido no virknē saslēgtiem **Ra**, **La**, regulējama sprieguma avota un strāvas mērīšanas blokiem.

Ierosmes tinums izveidots, ka **RL** tinums. To pievieno starp **F+** un **F-** līdzstrāvas mašīnas bloka portiem.

Mehāniska daļa veic līdzstrāvas mašīnas ātruma aprēķinu vadoties no slodzēs, padotas uz rotoru. Ātrums tiek izmantots, lai kompensētu enkura tinuma EDS E. Mehānisko daļu izveido *Simulink* bloki, tie īsteno vienādojumu:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - \text{sgn}(\omega)T_L - B_m\omega - T_f \quad (3.5)$$

kur:

J - inerce,

B_m - viskozs berzes koeficients,

T_f - Kulona berzes spēks.

Parametru logs:

Block Parameters: DC Machine

DC machine (mask) (link)

This block implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.

Parameters

Preset model: **No**

☒ Show detailed parameters

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]
[0.5 0.01]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]
[240 120]

Field-armature mutual inductance Laf (H) :
1.8

Total inertia J (kg.m²)
0.05

Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)
0.02

Coulomb friction torque Tf (N.m)
0

Initial speed (rad/s) :
0

OK Cancel Help Apply

Bloka parametri:

Armature resistance and inductance [Ra (Ohms) La (H)]:

[Enkura tinuma pretestība $Ra(\Omega)$ un $La(H)$ induktivitāte].

Field resistance and inductance [Rf (Ohms) Lf (H)]:

[Ierosmes tinuma pretestība $Rf(\Omega)$ un $Lf(H)$ induktivitāte].

Field-armature mutual inductance Laf (H):

[Ierosmes-enkura tinuma savstarpēja $Laf(H)$ induktivitāte].

Field-armature mutual inductance Laf (H):

[Ierosmes-enkura tinuma savstarpēja $Laf(H)$ induktivitāte].

Total inertia J (kg.m²):

[Mašīnas inerces moments $J(kg \cdot m^2)$ induktivitāte].

Viscous friction coefficient $B_m(N \cdot m \cdot s)$:

[Viskozas berzes koeficients $B_m(N \cdot m \cdot s)$].

Coulomb friction torque $T_f(N \cdot m)$:

[Kolomba berzes spēka konstanta $T_f(N \cdot m)$].

Initial speed (rad/s):

[Sākotnējs mašīnas vārpstas leņķiskais ātrums (rad/s)]. Lai uzsāktu mašīnas modelēšanu stabilā režīmā, sākotnēja slodzes ievada signālam T_L jābūt proporcionālām sākuma ātrumam.

DC Voltage Source	Līdzstrāvas avots
--------------------------	--------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: ar līdzstrāvas bloku izveidot nemainīga līmeņa spriegumu. Pozitīvais kontakts ir apzīmēts ar plus zīmi. Modelēšanas laika sprieguma vērtību var izmainīt jebkura brīdī.

Bloka parametri:

Amplitude (V):

[Amplitūda (V)]. Avota izejas sprieguma vērtība.

Measurements:

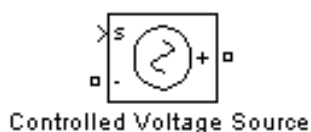
[Mērītie mainīgie]. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Voltage* – avota izejas spriegums.

Līdzstrāvas bloks ir izveidots, ka ideāls sprieguma avots, tādejādi tā pretestība ir vienāda ar nulli.

Controlled Voltage Source	Programmējams sprieguma avots
----------------------------------	--------------------------------------

Piktogramma:



Uzdevums: izveidot spriegumu no programmējama sprieguma avota atbilstoši vadības signālam. Ja ir vēlams uzsākt simulāciju stabila stāvoklī, ievadam jāpieslēdz signāls, kas atbilst blokā uzstādītiem sākuma vērtībām.

Bloka parametri:

Initialize:

[Inicializācija]. Ja tiek atzīmēts avota modelēšana sāksies saskaņā ar uzstādītiem sākuma parametriem: amplitūda, fāze un frekvence.

Source type:

[Avota tips]. Avota tips tiek uzradīts, ja ir nepieciešama avota inicializācija. Ja inicializācija nav uzdota, parametrs nav pieejams. Parametra vērtība tiek izvēlēta no saraksta:

- *AC* – maiņstrāvas avots,
- *DC* – līdzstrāvas avots.

Initial amplitude (V):

[Sākotnēja amplitūda (V)]. Izejas sprieguma sākumvērtība. Ja inicializācija nav uzdota, parametrs nav pieejams.

Phase (deg):

[Sākotnēja fāze (grādi)]. Izejas fāzes sākumvērtība. Parametrs ir pieejams, ja tiek inicializēts maiņstrāvas avots.

Initial frequency (Hz):

[Sākotnēja frekvence (Hz)]. Izejas frekvences sākumvērtība. Parametrs ir pieejams, ja tiek inicializēts maiņstrāvas avots.

Measurements:

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

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Voltage* – avota izejas spriegums.

Līdzstrāvas bloks ir izveidots, ka ideāls sprieguma avots, tādejādi tā pretestība ir vienāda ar nulli.

Series RLC branch	Virknē saslēgta RLC ķēde
-------------------	--------------------------

Piktogramma:



Series RLC Branch

Uzdevums: virknē saslēgt RLC ķēdes bloku, izveidot vienu pretestību, spoli, kondensatoru vai arī to kombinācijas. Visiem parametriem var arī būt negatīvas vērtības.

Bloka parametri:

Resistance R (Ohms):

[Pretestība $R(\Omega)$]. Aktīvas pretestības vērtība. Izslēgt ķēdes pretestību var, piešķirot tai nulles vērtību. Šinī gadījumā rezistors netiks atspoguļots bloka piktogrammā.

Inductance L (H):

[Induktivitāte $L(H)$]. Induktivitātes vērtība. Izslēgt ķēdes induktivitāti var, piešķirot tai nulles vērtību. Šinī gadījumā spole netiks atspoguļota bloka piktogrammā.

Capacitance C (F):

[Kapacitāte $C(F)$]. Kapacitātes vērtība. Izslēgt ķēdes kapacitāti var, piešķirot tai bezgalības vērtību (inf). Šinī gadījumā kondensators netiks atspoguļots bloka piktogrammā.

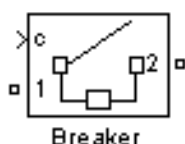
Measurements:

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

- *None* – mērījumi netiek veikti,
- *Branch voltage* – ķēdes spriegums,
- *Branch current* – ķēdes strāva,
- *Branch voltage and current* – ķēdes spriegums un strāva.

Breaker	Slēdzis
----------------	----------------

Piktogramma:



Uzdevums: ar bloku modelēt strāvas ieslēgšanas un izslēgšanas ierīci. Slēdzis tiek vadīts ar ārēji padoto signālu vai ar integrēto taimeru. Ieslēgšana ir vadīta ar vieninieka vērtības signālu un izslēgšana ar nulles vērtības signālu. Ķēde tiek pārtraukta arī tāda gadījuma, ja fāzes strāva sasniedz nulles vērtību. Ierīcē ir iekļauta loka dzesēšanas RC ķēde, tā saslēgta paralēli slēdža kontaktiem.

Bloka parametri:

Breakers resistance R_{on} (Ohm):

[Kontaktu pretestība ieslēgta stāvoklī **R_{on}** (Ω)].

Initial state (0 for „open” 1 for „closed”):

[Sākotnējais stāvoklis (0 - „atvērts” 1 - „aizvērts”).]

Snubbers resistance R_p (Ohm):

[Loka dzesēšanas ķēdes pretestība **R_s** (Ω)].

Snubbers capacitance $C_p(F)$:

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

Switching times (s):

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

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

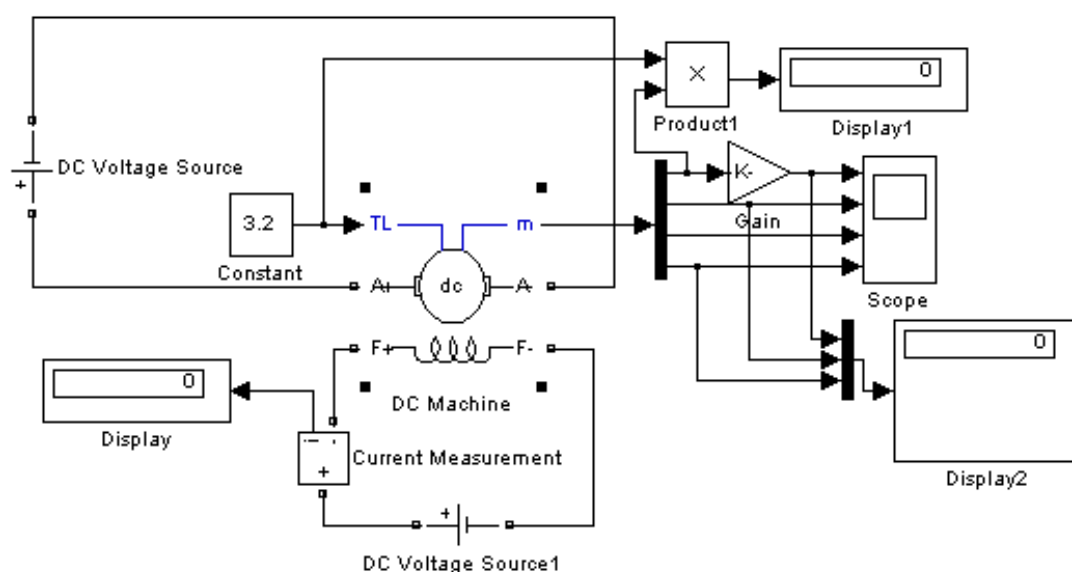
Measurements:

[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).

3.2. Neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja strukturāla modeļa izstrāde

Izstrādāts neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja modelis ir parādīts zemāk (3.2.att.). Līdzstrāvas dzinēja parametri tiek aprēķināti, balstoties uz dzinēja pasē norādītiem tehniskiem datiem. Aprēķināsim ierosmes tinuma induktivitāti, enkura tinuma induktivitāti, ierosmes un enkura tinumu savstarpējo induktivitāti, viskozs berzes koeficients un Kulona berzes spēku.



3.2.att. Virtuālais modelis neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja pētīšanai

Mašīnas parametru aprēķiniem tiek izmantoti sekojoši izejdati:

U_a - enkura tinuma nominālais spriegums [V], L_a - enkura tinuma induktivitāte [H],

U_f - ierosmes tinuma nominālais spriegums [V], η - lietderības koeficients,

R_a - enkura tinuma pretestība [Ω], R_f - ierosmes tinuma pretestība [Ω],

n_n - rotora nominālais griešanas ātrums (apgr./min), P_n - nomināla jauda [W]

Līdzstrāvas mašīnas parametri tika aprēķināt pēc sekojošām izteiksmēm [1-5, 9-14]:

Ierosmes tinuma spriegums [V]:

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} \quad (3.6)$$

Nominālais moments [$N \cdot m$]:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30P_n}{\pi n_n} \quad (3.7)$$

Enkura tinuma nomināla strāva [A]:

$$I_{an} = \frac{P_n}{U_a \cdot \eta_n} - I_f \quad (3.8)$$

Ierosmes un enkura tinuma savstarpēja induktivitāte [H]:

$$L_{af} = \frac{M_n}{I_{an} \cdot I_f} \quad (3.9)$$

Ierosmes tinuma induktivitāte [H]:

$$L_f \geq (2-5) \frac{L_a \cdot R_f}{R_a} \quad (3.10)$$

Viskozs berzes koeficients [$N \cdot m \cdot s$]:

$$B_m \approx \frac{\Delta P_{meh}}{2\omega_n^2} \quad (3.11)$$

Kulona berzes spēks [$N \cdot m$]:

$$T_f \approx \frac{\Delta P_{meh}}{2\omega_n} \quad (3.12)$$

Kopējie mehāniskie zudumi [W]:

$$\Delta P_{meh} = (0.5 - 2\%)P_n \quad (3.13)$$

3.3. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M palaišanas un stacionāra režīma pētīšana

Kā pētīšanas objekts ir izvēlēts neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinējs 2ΠH-90M. 2ΠH-90M dzinēja tehniskie dati un aprēķinā iegūtie rezultāti ir apkopoti zemāk (3.1.,3.2.tabulas):

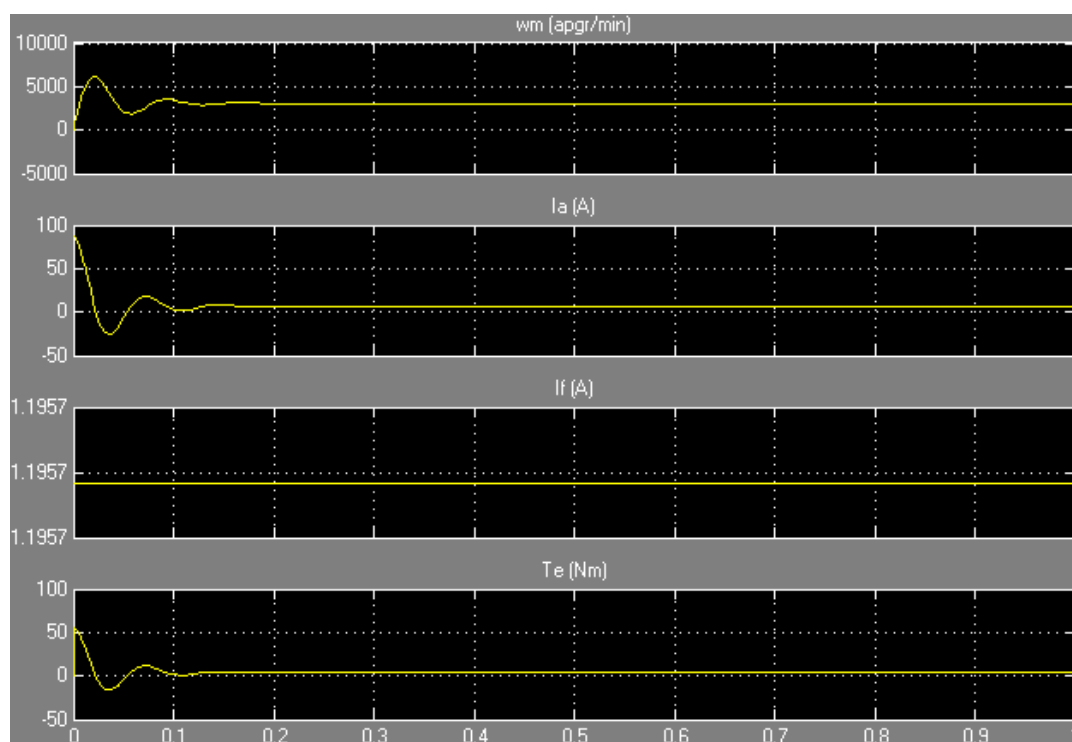
3.1.tabula. 2ΠH-90M tehniskie dati

U_a [V]	U_f [V]	P_n [kW]	n_n [apgr/min]	η [%]	R_a [Ω]	R_f [Ω]	L_a [H]	J [kg·m ²]
220	110	1	3000	72.5	2.52	92	0.048	0.01

3.2.tabula. Aprēķinu rezultāti

B_m [N·m·s]	T_f [N·m]	L_f [H]	L_{af} [H]
0.000025	0.01	3.5	0.53

Tehniskie dati un aprēķina rezultāti tika ieviesti blokā *DC Mashine*. Zemāk ir parādīti ar bloka *Scope* palīdzību iegūtie rezultāti, pie $T_L=4 \text{ Nm}$ (3.3.att.).



3.3.att. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M parametri pie $T_L=4 \text{ Nm}$ ($\omega_m, I_a, I_f, T_e=f(t)$)

Grafikos atspoguļoti (secība no augšas uz leju): rotora griešanas leņķiskais ātrums (ω_m), enkura tinumu strāva (I_a), ierosmes tinumu strāva (I_f), elektromagnētiskais moments (T_e). Tie parāda līdzstrāvu dzinēja 2ΠH-90M darbību palaišanas un stacionāra režīmos procesu modelējot pie nemainīgas slodzes. Eksperimentā iegūtie rezultāti ir apkopoti zemāk (3.3.tab.).

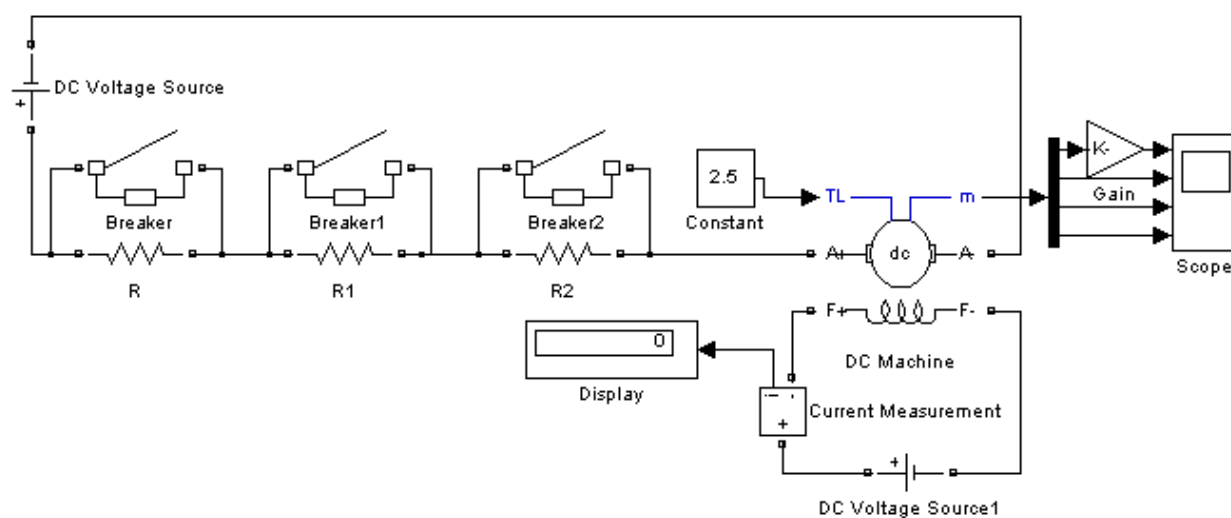
3.3.tabula. Eksperimentā iegūtie rezultāti

T_m [Nm]	T_e [Nm]	ω_m [apgr/min]	P [W]	I_a [A]	I_f [A]	$I_{\text{palaišanas}}$ [A]	$t_{\text{palaišanas}}$ [s]
0	0.018	3314	0	0.029	1.196	87.30	0.16
1	1.015	3254	340.8	1.607	1.196	87.30	0.16
2	2.016	3194	669.0	3.184	1.196	87.30	0.16
3	2.977	3134	984.7	4.762	1.196	87.30	0.16
4	3.926	3074	1288.0	6.339	1.196	87.30	0.18

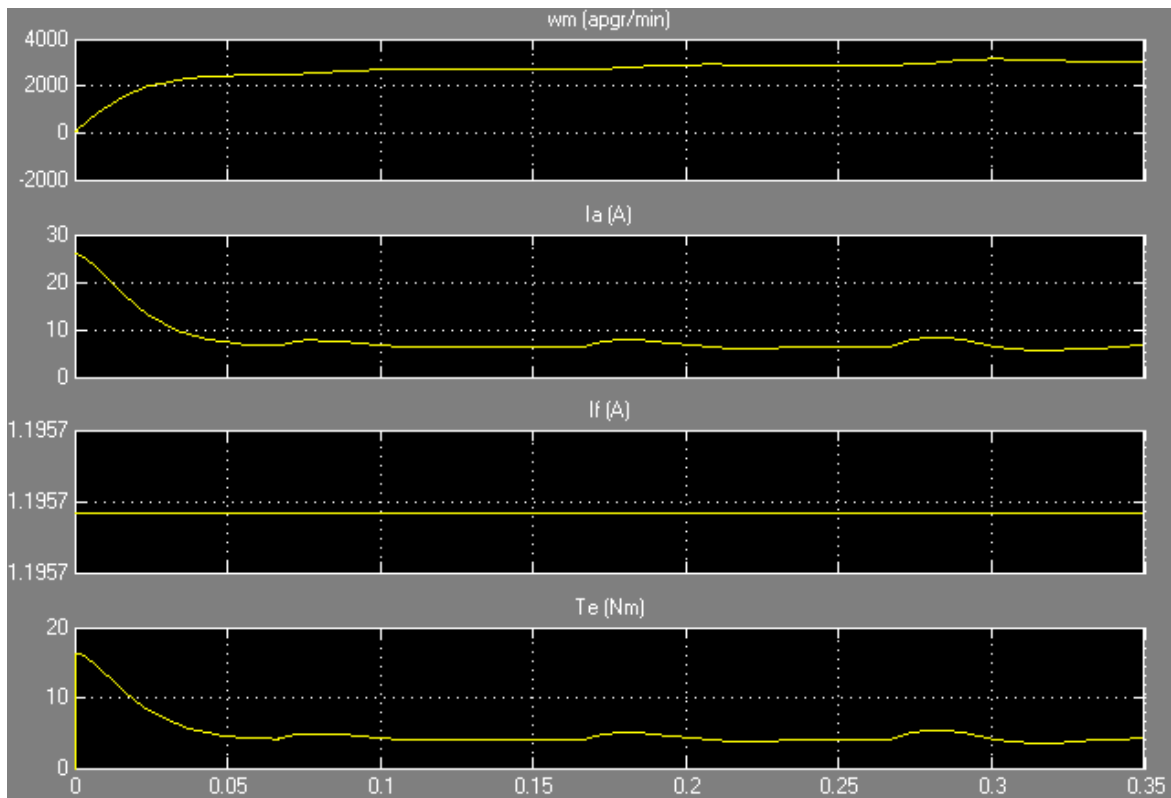
Līdzstrāvas dzinēja virtuālo modeli (3.2.att.) ir izdevīgi izmantot, pētot dzinēja parametru izmaiņu pie dažādiem palaišanas apstākļiem.

3.4. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M palaišanas strāvas ierobežošana

Līdzstrāvas dzinējiem piemīt ļoti lielas palaišanas strāvas. Palaišanas strāvu ierobežo pieslēdzot enkura tinumam palaišanas reostatu. Izstrādātais modelis ir parādīts zemāk (3.4.-3.5.att.).



3.4.att. Līdzstrāvas dzinēja palaišanas ar palaišanas reostatu modelis



3.5.att. Līdzstrāvas dzinēja palaišana ar palaišanas reostatu ($R=6\ \Omega$), $T_L=4\ \text{Nm}$ ($\omega_m, I_a, I_f, T_e=f(t)$)

Pirms rotora palaišanas reostata pretestība tiek uzstādīta līdz maksimālai vērtībai, palaišanas laikā pretestības vērtība pakāpeniski tiek samazināta līdz nulles vērtībai. Pretestības ieviešana nodrošina līdzstrāvas dzinēja enkura tinuma un kolektora ilgtermiņa darba spēju. Iegūtie rezultāti apkopoti zemāk (3.4.tab):

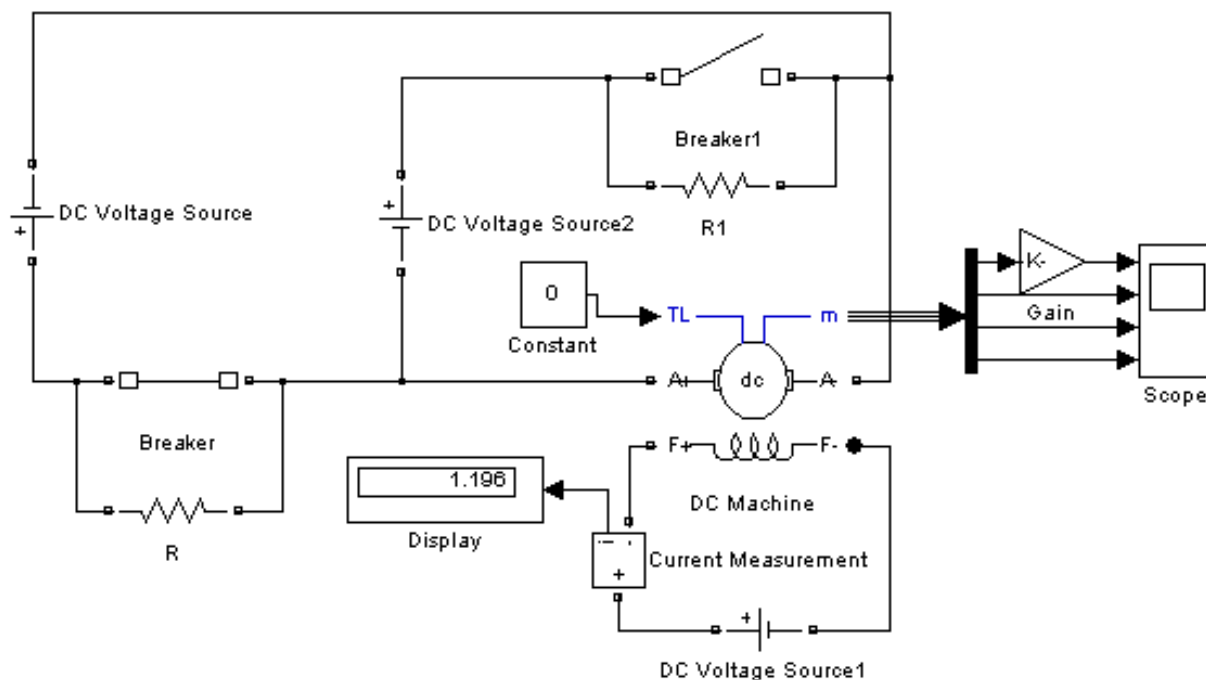
3.4.tabula. Eksperimentā iegūtie rezultāti $T_L=2\ \text{Nm}$

R [Ω]	I_{palaišanas} [A]	t_{palaišanas} [s]	R [Ω]	I_{palaišanas} [A]	t_{palaišanas} [s]
0	87.30	0.16	12	15.15	0.25
3	39.85	0.10	15	12.56	0.28
6	25.82	0.14	18	10.72	0.32
9	19.10	0.21	21	9.35	0.36

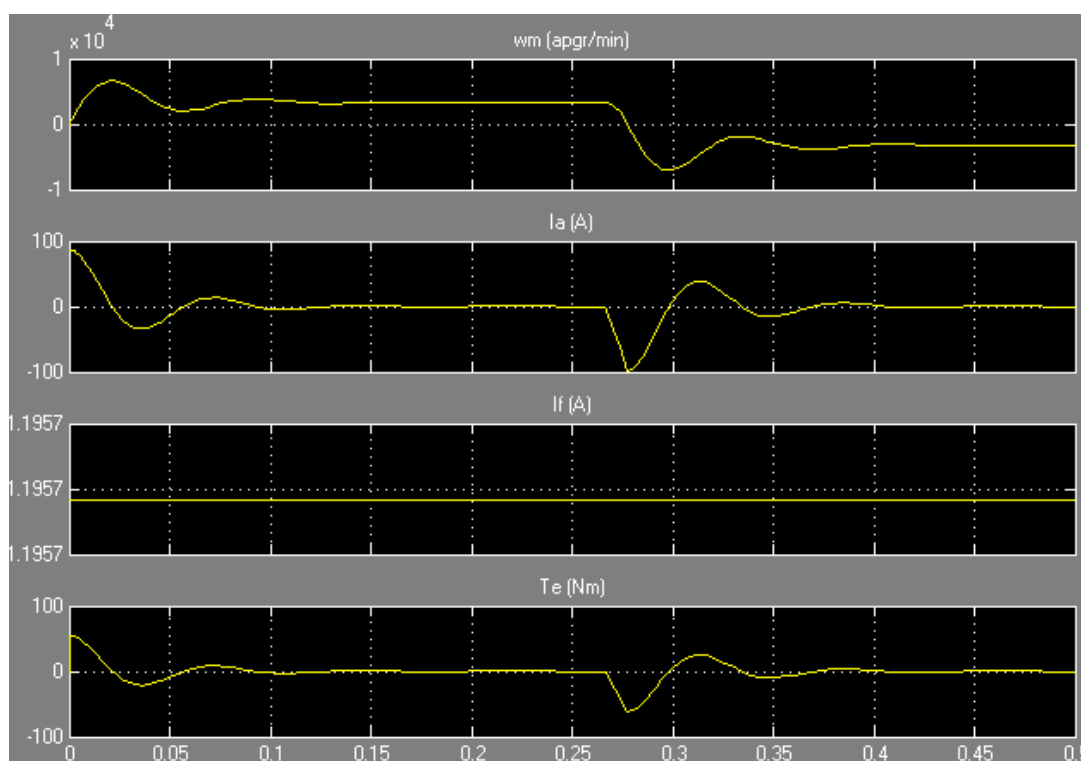
Pēc iegūtiem rezultātiem var secināt, kā ar palaišanas reostatu var samazināt sākotnējās enkura tinuma strāvas un to sākuma svārstības, kā arī padarīt palaišanas procesu laidenāku.

3.5. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M reversēšana

Viens no līdzstrāvas dzinēja reversēšanas paņēmieniem ir pretslēguma metode, kad dzinējam enkuram maina pievadīta sprieguma polaritāti, lai to parādīt tika izveidots sekojošais modelis (3.6.att.):



3.6.att. Līdzstrāvas dzinēja reversēšanas modelis



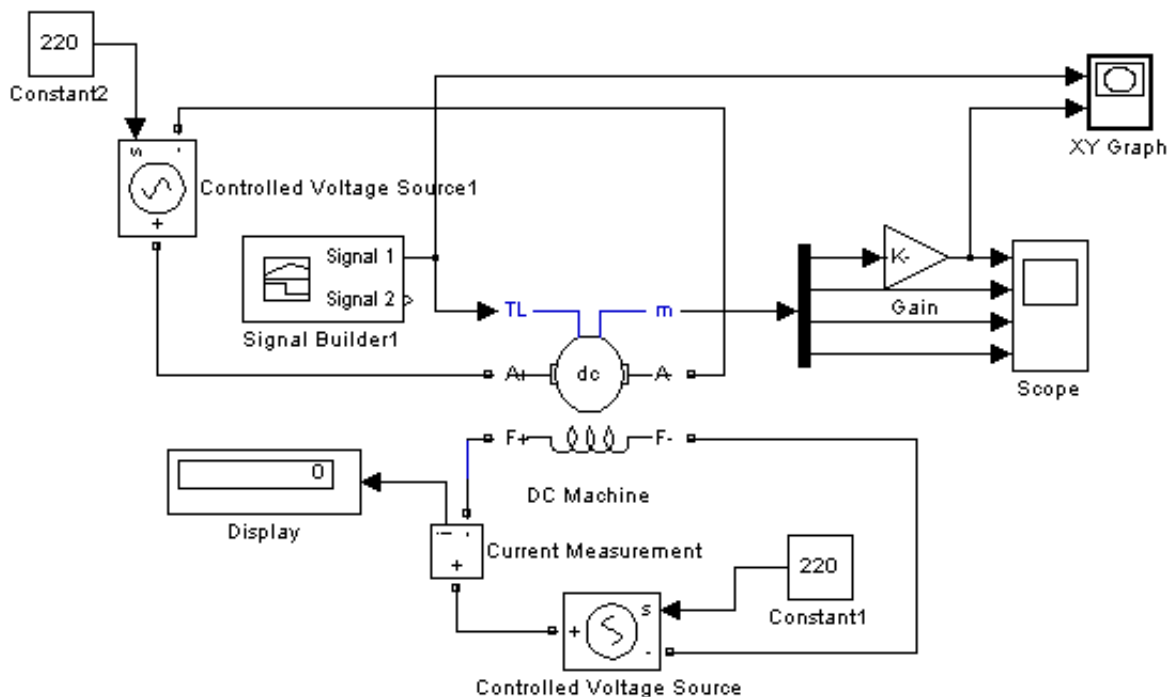
3.7.att. Līdzstrāvas dzinēja reversēšana $T_L=0$ Nm ($\omega_m, I_a, I_f, T_e=f(t)$)

3.7. attēlā atspoguļoti (secība no augšas uz leju): rotora griešanas leņķiskais ātrums (ω_m), enkura tinumu strāva (I_a), ierosmes tinumu strāva (I_f), elektromagnētiskais moments (T_e). Ir

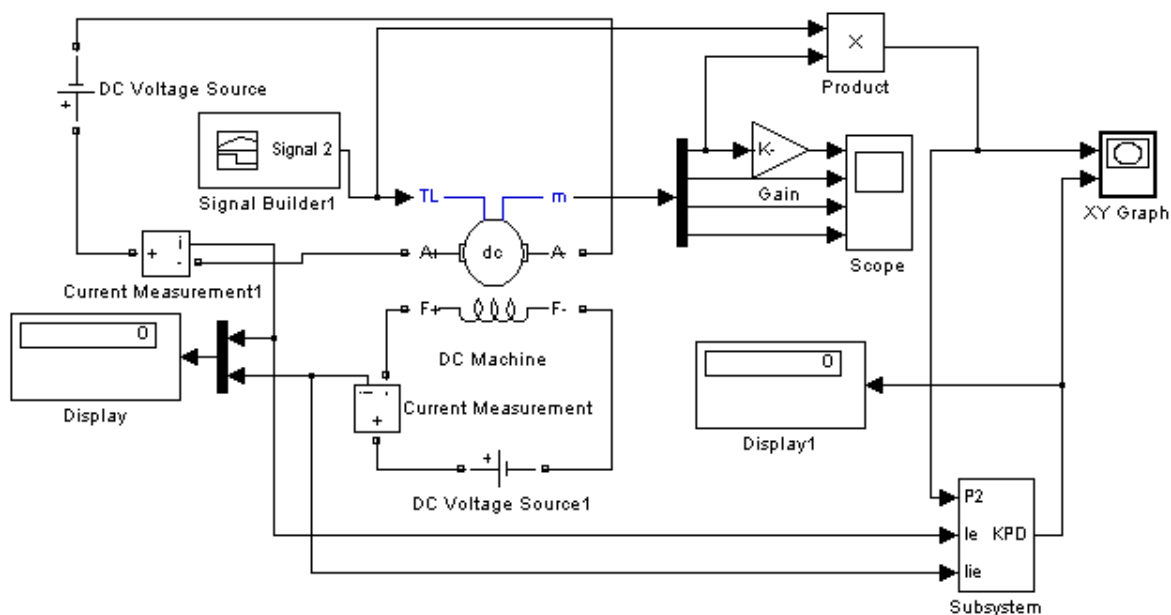
redzams, kā enkura tinumam pievadīta sprieguma polaritātes izmaiņa pieved pie straujas rotora griešanas virziena izmaiņai.

3.6. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M darba raksturlīkņu veidošana

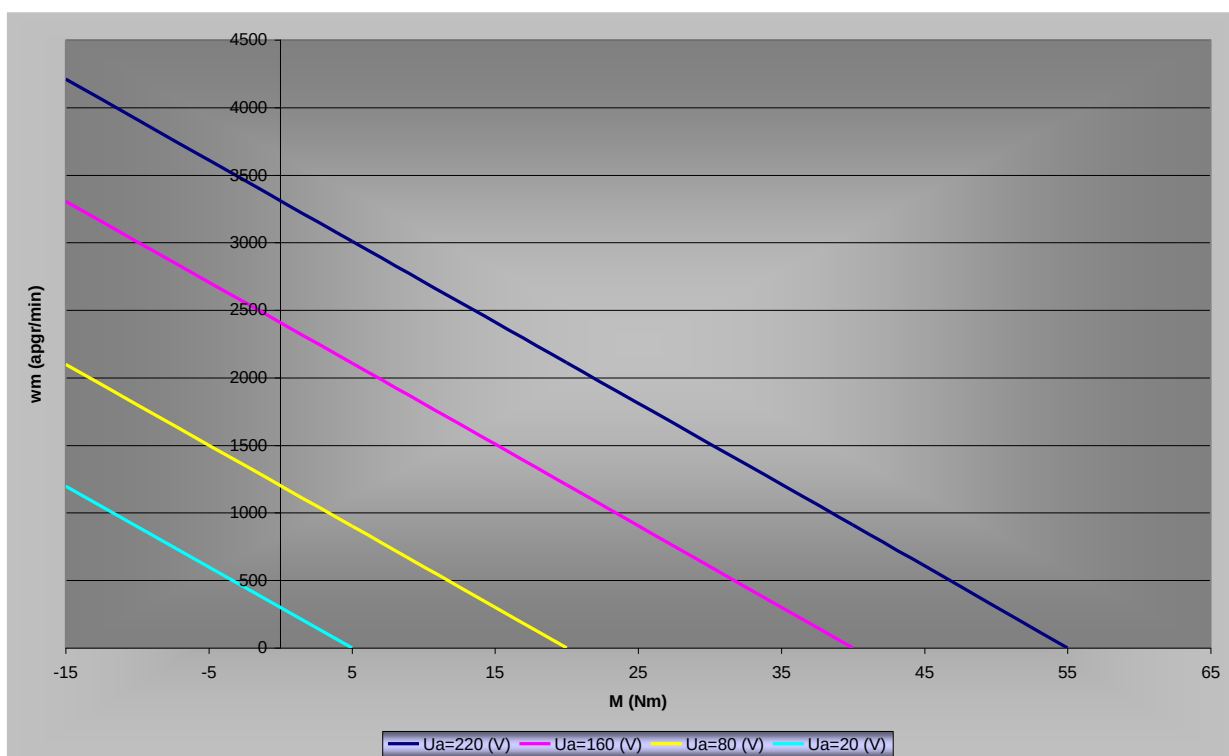
Lai raksturotu līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M darbību pie mainīgām slodzēm izveidoti sekojošie modeli (3.8.-3.9.att.):



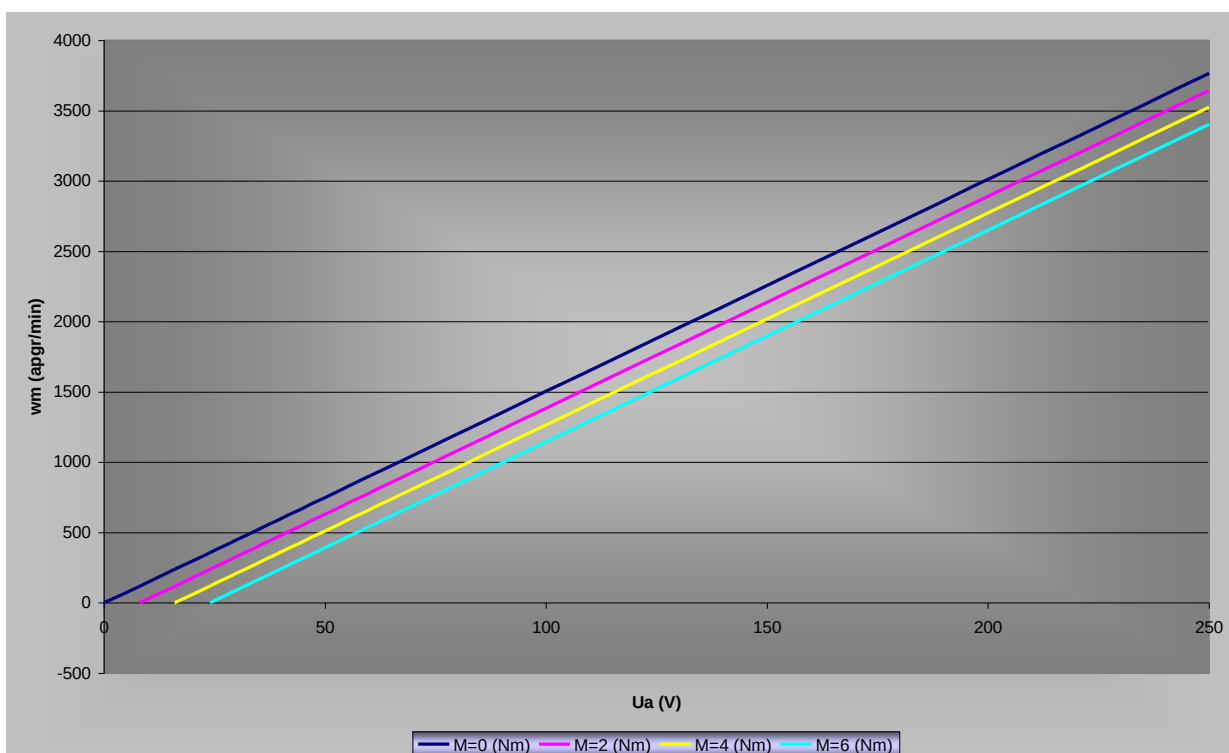
3.8.att. Neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja mehānisko un regulēšanas raksturlīkņu konstruēšanas modelis ($\omega_m=f(M)$, $f(U_a)$, $f(U_f)$)



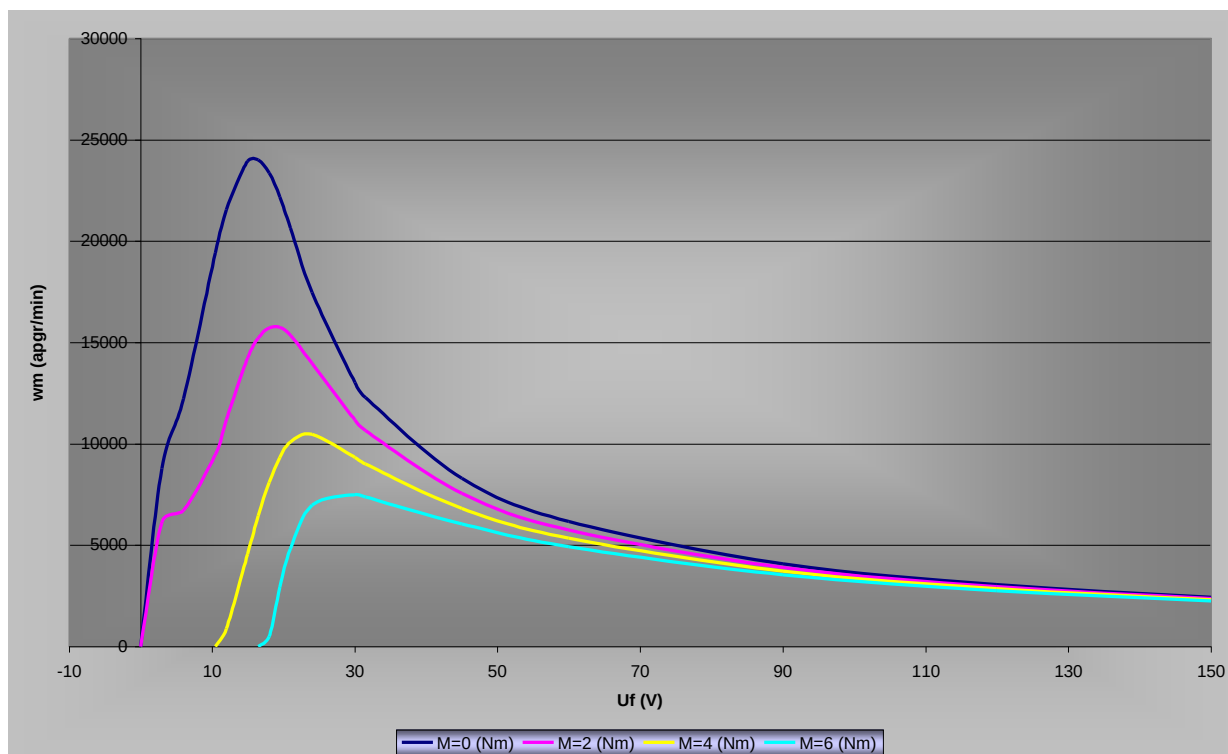
3.9.att. Neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficienta raksturlīknes konstruēšanas modelis ($\eta=f(P)$)



3.10.att. Līdzstrāvas dzinēja 2ПН-90M mehāniskās raksturlīknes ($\omega_m = f(M)$)



3.11.att. Līdzstrāvas dzinēja 2ПН-90M regulēšanas raksturlīknes ($\omega_m = f(U_a)$)



3.12.att. Līdzstrāvas dzinēja 2ΠH-90M regulēšanas raksturlīknes ($\omega_m=f(U_f)$)

Mehāniskas raksturlīknes, kuras parāda rotora griešanas ātruma atkarību no griezes momenta pie dažādām enkura sprieguma vērtībām, ir iegūtas no līdzstrāvas dzinēja modeļa (3.8.att.) mainot kustības pretošanās momentu T_L (bloks *Signal Builder*) Modelēšanas rezultāti ir parādīti attēlā 3.10. Augstāka no tiem atbilst nominālam enkura spriegumam un to sauc par dabīgo dzinēja mehānisko raksturlīkni, visas pārējās raksturlīknes ir mākslīgas. Ar enkura sprieguma vērtības samazināšanu tie nobīdās uz leju.

Pie regulēšanas raksturlīkņu konstruēšanas tiek noteikta rotora griešanas ātruma atkarība no enkura tinumu sprieguma pie nemainīgas pieliktas slodzes (3.11.att.) un rotora griešanas ātruma atkarība no ierosmes tinumu sprieguma pie nemainīgas pieliktas slodzes (3.12.att.). Dati tiek iegūti, izmantojot kontrolējamo sprieguma avotu (bloks *Controlled Voltage Source*), kurā var mainīt sprieguma vērtību modulēšanas laikā (3.8.att.) un mainot kustības pretošanās momentu T_L (bloks *Signal Builder*).

Lietderības koeficienta noteikšanai tiek izmainīts kustības pretošanās moments T_L un tiek noņemta atkarība $\eta=f(P)$, dzinēja jauda un lietderības koeficients tiek aprēķināti pēc sekojošām izteiksmēm [1-4,9-14]:

$$P_e = U_a I_a + U_f I_f \quad (3.14)$$

$$P_m = \frac{M}{\omega_m} \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \quad (3.16)$$

kur:

P_e - elektriska jauda (W),

P_m - mehāniska jauda (W),

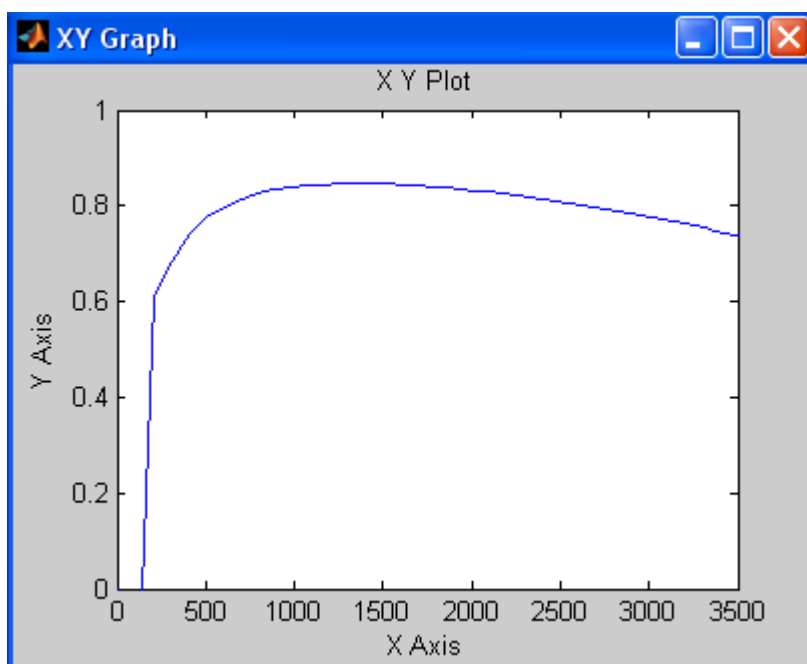
M - rotora griešanas moments (Nm),

U_a, U_f - enkura, ierosmes tinumu spriegumi (Nm),

I_a, I_f - enkura, ierosmes tinumu strāvas (Nm),

M - rotora griešanas moments (Nm),

ω_m - rotora leņķiskais ātrums [rad/s].

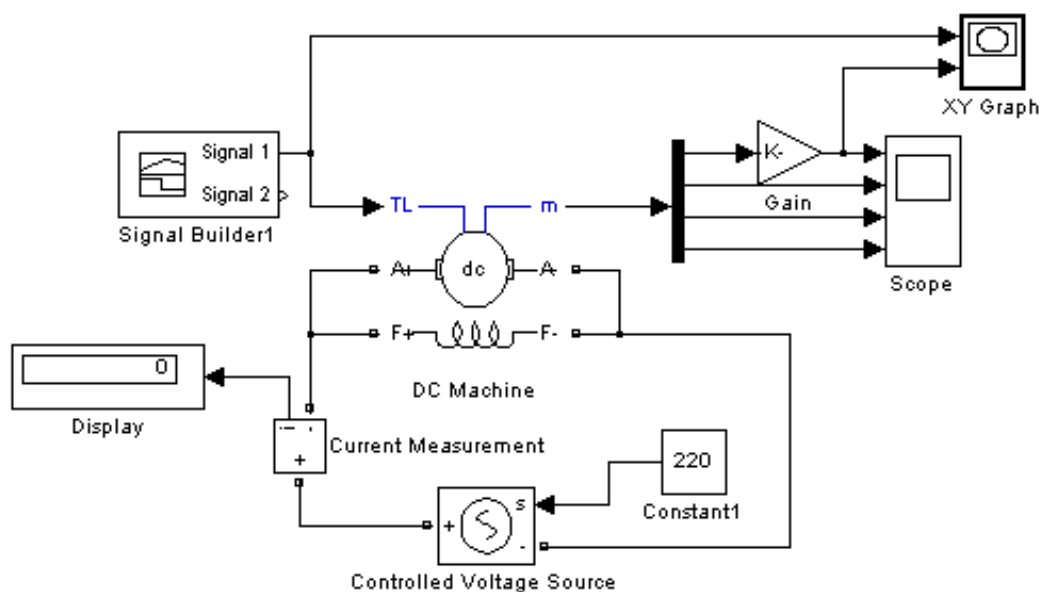


3.13.att. Līdzstrāvas dzinēja 2PIH-90M lietderības koeficienta raksturlīkne ($\eta=f(P)$)

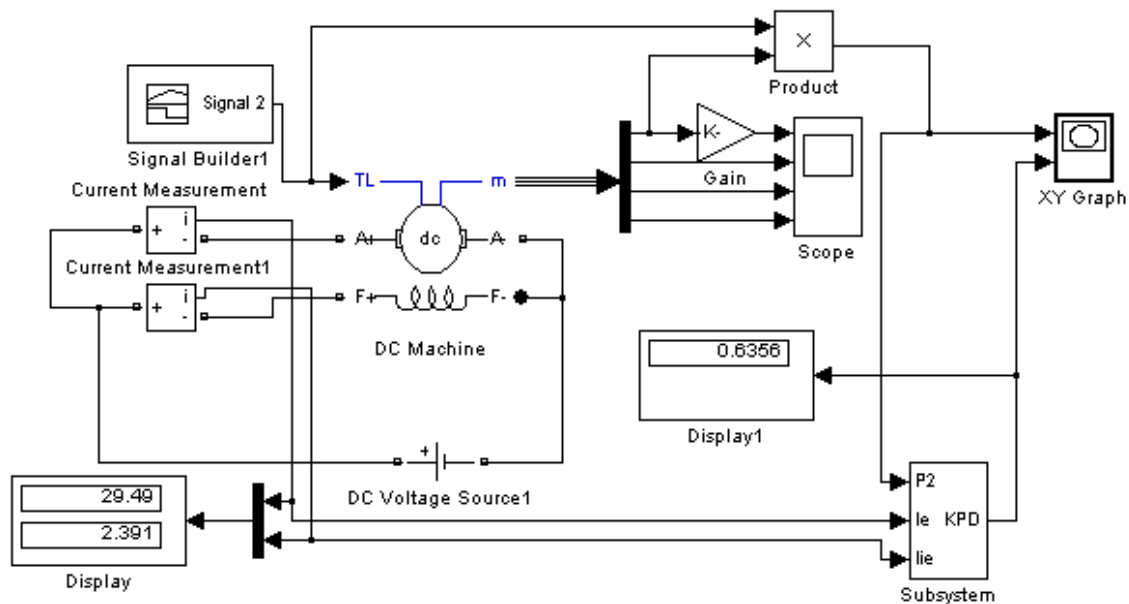
3.7. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja darba raksturlīkņu veidošana

Paralēlas ierosmes līdzstrāvas mašīnai ir nepieciešams viens sprieguma avots, enkura un ierosmes tinumi saslēgti paralēli. Modelēšanai tika paņemti neatkarīgas ierosmes dzinēja 2PIH-90M tehniskie dati ņemot vērā, ka ierosmes tinuma spriegums sasniedz 220 V. Tika veikts enkura un ierosmes tinumu savstarpējas induktivitātes aprēķins, pieņemot, kā nomināla momenta

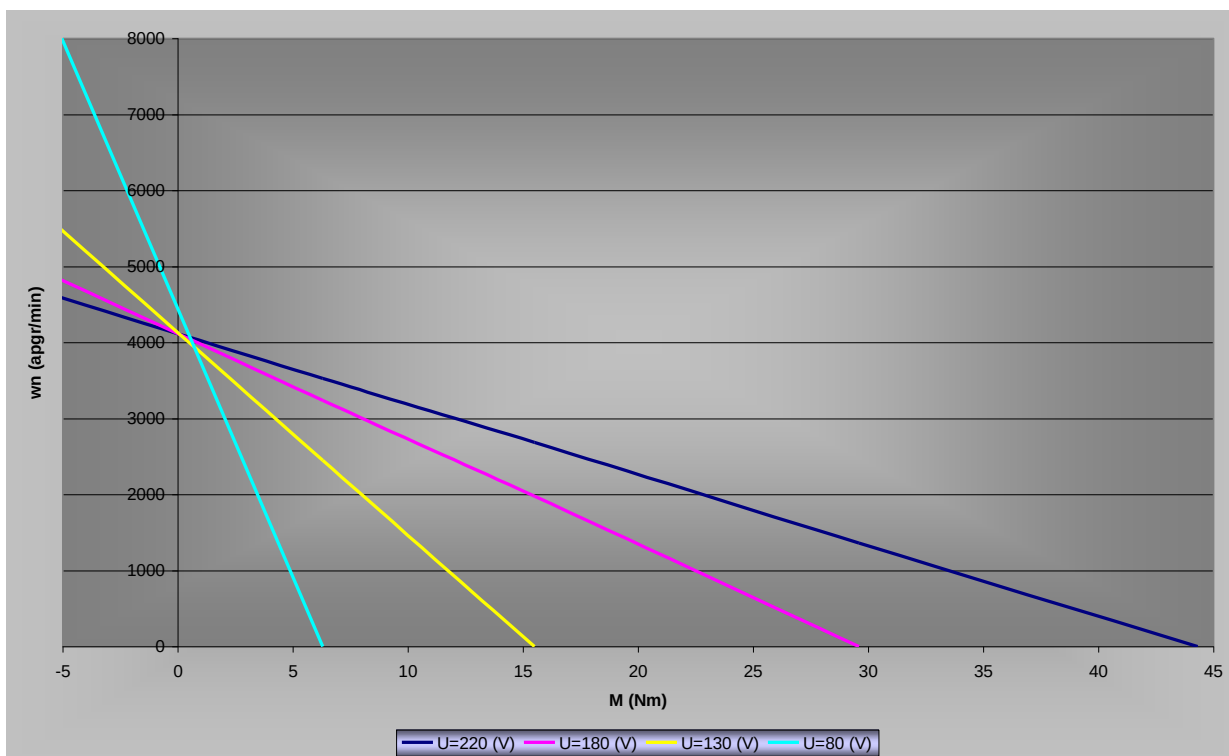
vērtība neizmainījās ($Laf=0.2125(H)$). Paralēlas ierosmes līdzstrāvas elektrodzinēja darba raksturlīkņu veidošanas modelis ir parādīts zemāk (3.14.,3.15.att.).



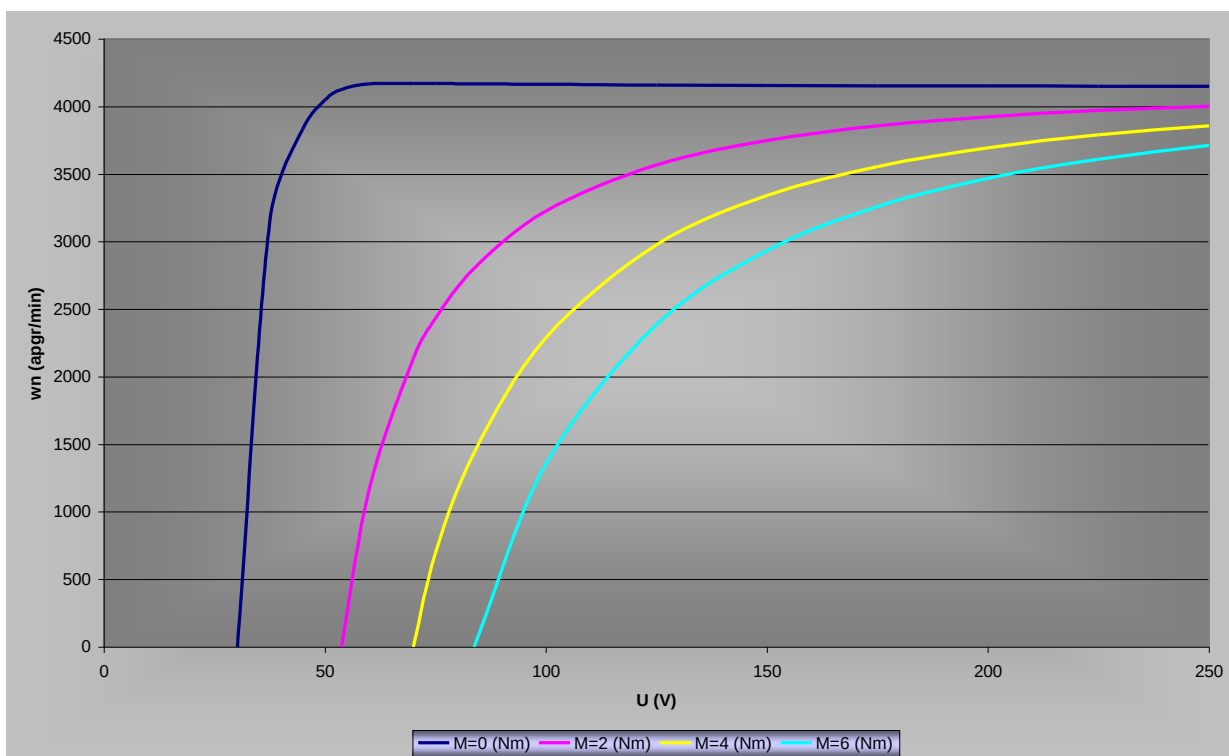
3.14.att. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja mehānisko un regulēšanas raksturlīkņu konstruēšanas modelis ($w_m=f(M)$, $f(U)$)



3.15.att. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficienta raksturlīknes konstruēšanas modelis ($\eta=f(P)$)



3.16.att. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja mehāniskās raksturlīknes ($w_n = f(M)$)



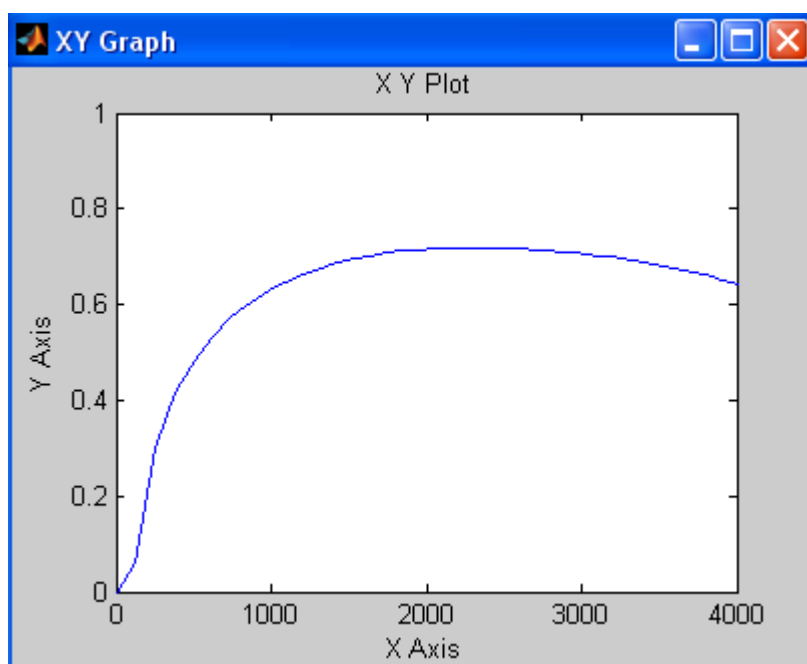
3.17.att. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja regulēšanas raksturlīknes ($w_n = f(U)$)

Mehāniskās raksturlīknes, kuras parāda paralēlas ierosmes līdzstrāvas elektrodzinēja rotora griešanas ātruma atkarību no griezes momenta pie dažādām sprieguma vērtībām, ir iegūtas no modeļa (3.14.att.) mainot kustības pretošanās momentu T_L (bloks *Signal Builder*).

Modelēšanas rezultāti ir parādīti attēlā 3.16. Raksturlīknes parāda, jo mazāka ir padota sprieguma vērtība, jo straujāk, pieaugot slodzei, samazinās rotācijas frekvence.

Pie regulēšanas raksturlīkņu konstruēšanas tiek noteikta rotora griešanas ātruma atkarība no enkura un ierosmes tinumu sprieguma pie nemainīgas pieliktas slodzes (3.17.att.). Dati tiek iegūti, izmantojot kontrolējamo sprieguma avotu (bloks *Controlled Voltage Source*), kurā var mainīt sprieguma vērtību modulēšanas laikā (3.14.att.).

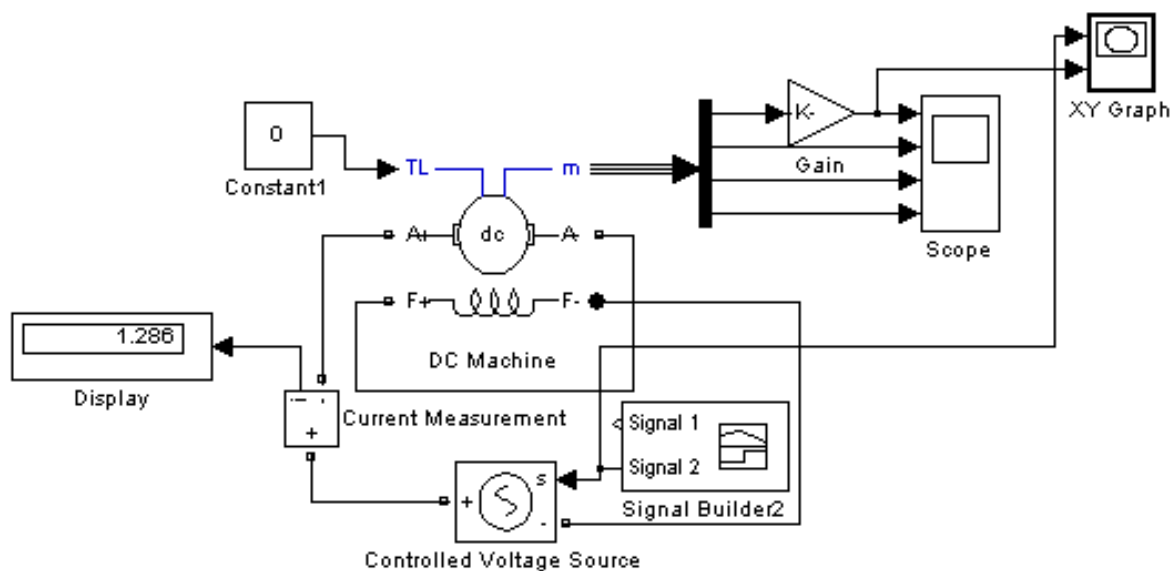
Lietderības koeficienta noteikšanai tiek izmainīts kustības pretošanās moments T_L un tiek noņemta atkarība $\eta=f(P)$, dzinēja jauda un lietderības koeficients tiek aprēķināti pēc izteiksmēm (3.14-3.16). Iegūta raksturlīkne parādīta attēlā 3.18.



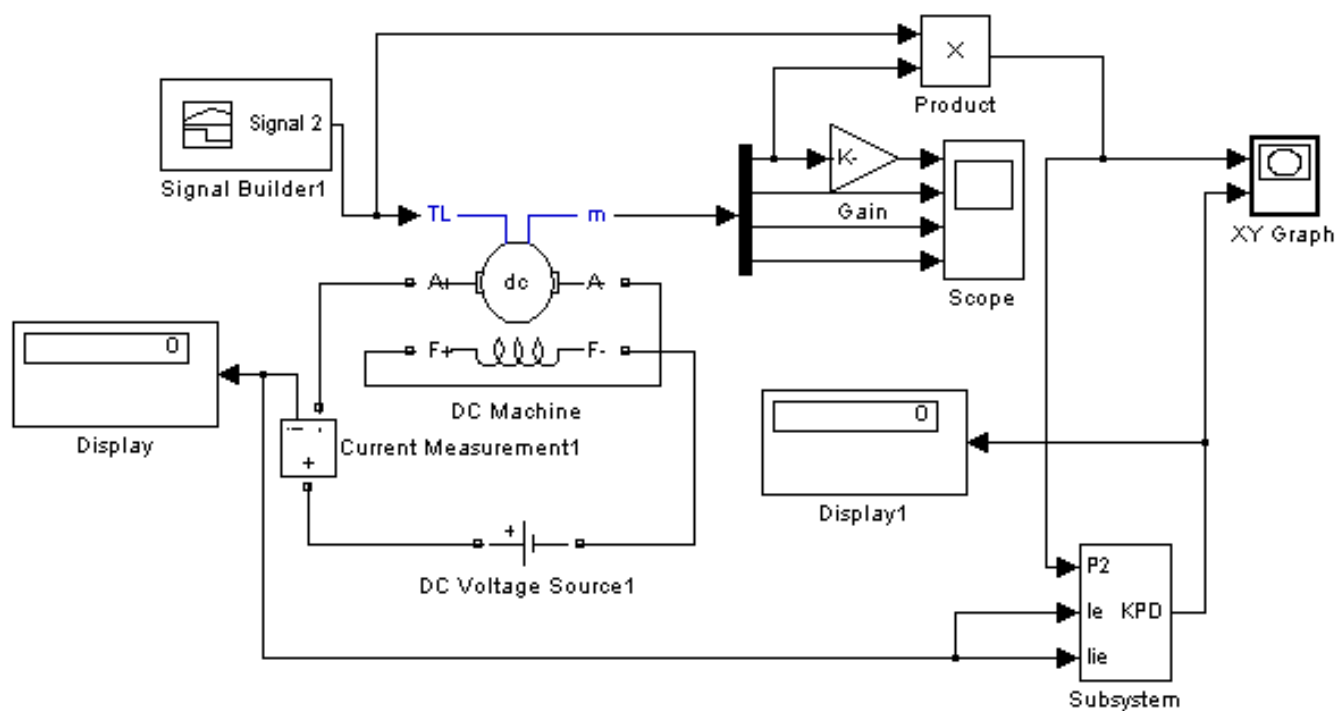
3.18.att. Parālēlas ierosmes līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficienta raksturlīkne ($\eta=f(P)$)

3.8. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja darba raksturlīkņu veidošana

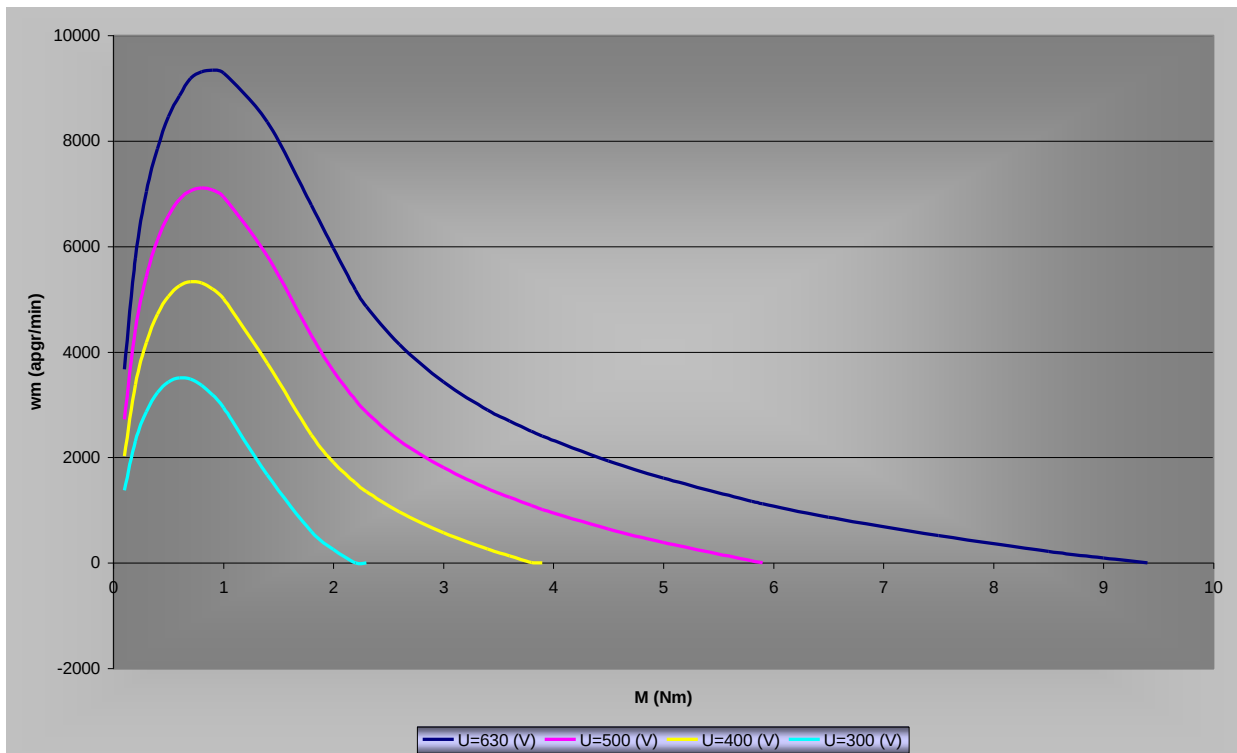
Virknes ierosmes līdzstrāvas mašīnā enkura un ierosmes tinumi tiek saslēgti virknē. Modelēšanai tika paņemti parālēlas ierosmes dzinēja modelēšanā izmantotie tehniskie dati. Virknes ierosmes līdzstrāvas elektrodzinēja darba raksturlīkņu veidošanas modelis ir parādīts zemāk (3.19.,3.20.att.).



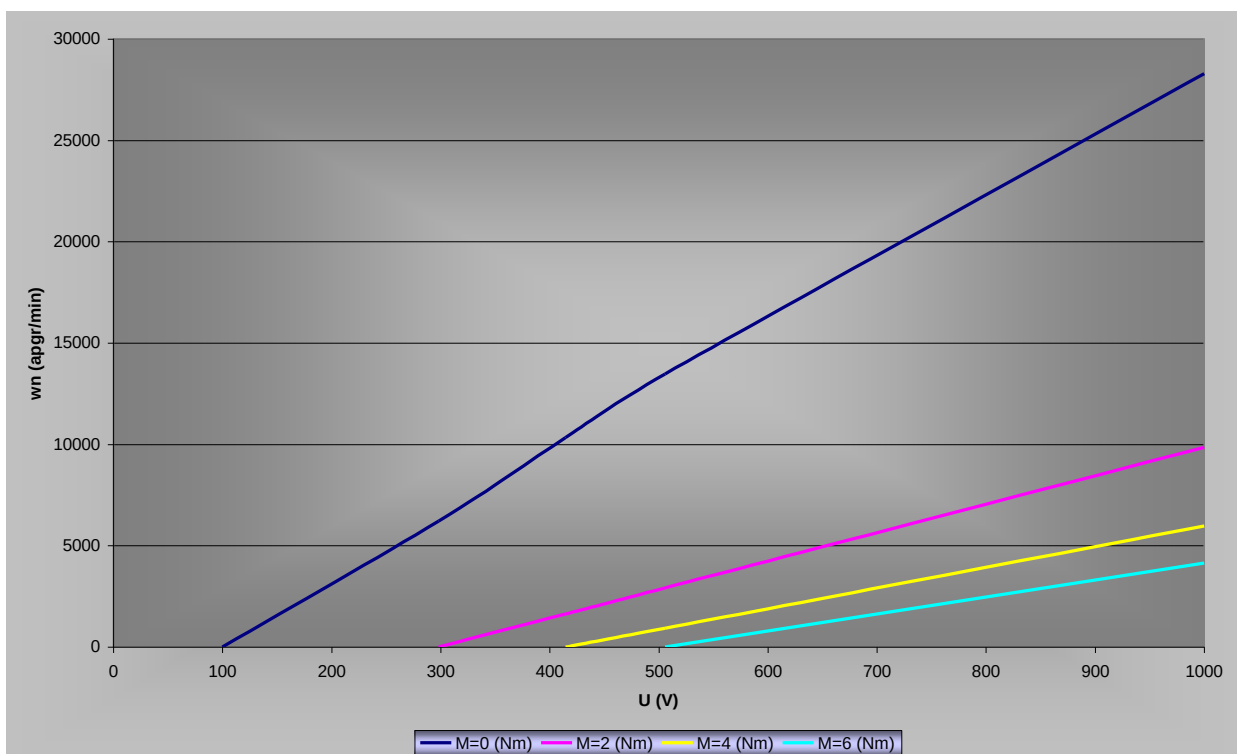
3.19.att. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja mehānisko un regulēšanas raksturliķņu konstruēšanas modelis ($w_m=f(M)$, $f(U)$)



3.20.att. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficienta raksturliķnes konstruēšanas modelis ($\eta=f(P)$)



3.21.att. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja mehāniskās raksturlīknes ($\omega_m=f(M)$)

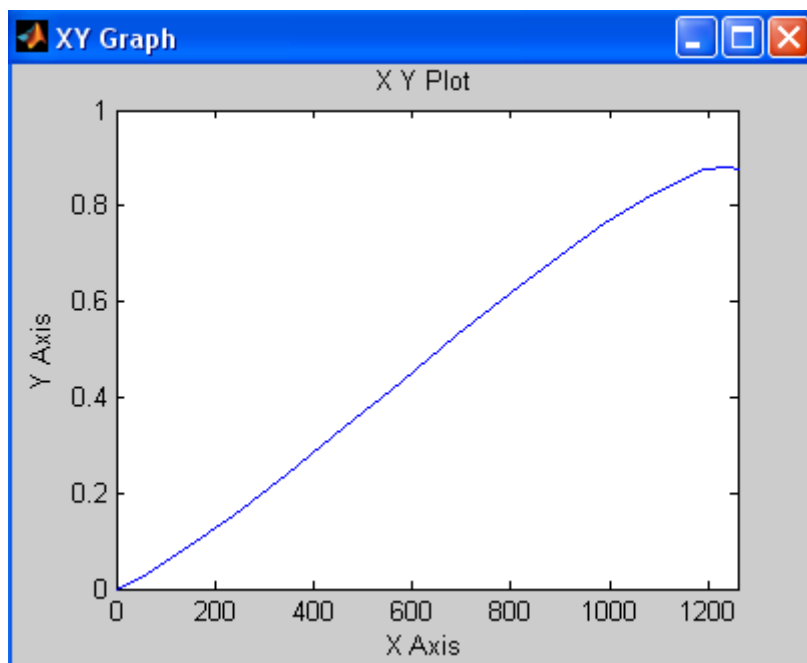


3.22.att. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja regulēšanas raksturlīknes ($\omega_m=f(U_a)$)

Mehāniskās raksturlīknes, kuras parāda virknes ierosmes līdzstrāvas elektrodzinēja rotora griešanas ātruma atkarību no griezes momenta pie dažādām sprieguma vērtībām, ir iegūtas no modeļa (3.19.att.) mainot kustības pretošanās momentu T_L (bloks *Signal Builder*) Modelēšanas rezultāti ir parādīti attēlā 3.21. Raksturlīknes parāda, kā nenoslogotām virknes ierosmes

līdzstrāvas dzinējam rotora rotācijas frekvence strauji pieaug, tāpēc to nedrīkst palaist un darbināt tukšgaita vai ar slodzi, kas mazāka par 20-25% no nominālās.

Pie regulēšanas raksturlīkņu konstruēšanas tiek noteikta rotora griešanas ātruma atkarība no enkura un ierosmes tinumu sprieguma pie nemainīgas pieliktas slodzes (3.22.att.). Dati tiek iegūti, izmantojot kontrolējamo sprieguma avotu (bloks *Controlled Voltage Source*), kurā var mainīt sprieguma vērtību modulēšanas laikā (3.19.att.). Lietderības koeficienta noteikšanai tiek izmainīts kustības pretošanās moments T_L un tiek noņemta atkarība $\eta=f(P)$, dzinēja jauda un lietderības koeficients tiek aprēķināti pēc izteiksmēm (3.14-3.16). Iegūta raksturlīkne parādīta attēlā 3.21.

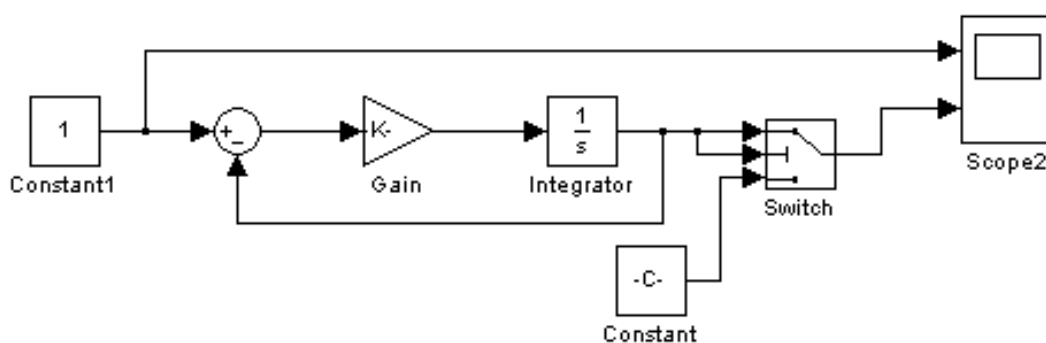


3.21.att. Virknes ierosmes līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficienta raksturlīkne ($\eta=f(P)$)

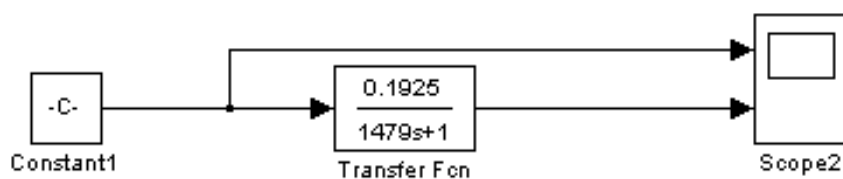
4. Elektrisko mašīnu siltuma režīmu apskats

Elektriskām mašīnām ir diezgan sarežģīta izbūve, tādēļ, lai atvieglotu siltuma režīmu aprēķinu, par pamatu var izmantot ideāla homogēna cieta ķermeņa teoriju. Tas nozīmē, kā asinhronais dzinējs tiek uzskatīts par viendabīgo ķermeni, kurā temperatūra izpaužas vienmērīgi un visiem ķermeņa punktiem piemīt vienāda temperatūra. Jāatzīmē, ka silšanas process elektriskajās mašīnās ir sarežģītāks par šeit aplūkoto, jo īstenībā elektriskā mašīna nav homogēns ķermenis. Tā sastāv no atsevišķām daļām, kuras atdalītas ar izolāciju, turklāt izolācijai ir relatīvi zema siltumvadītspēja, un tāpēc mašīnas atsevišķām daļām ir dažāda virstemperatūra. Šo atsevišķo daļu virstemperatūru var noteikt precīzāk, ja elektrisko mašīnu aplūko kā vairāku tādu homogēnu ķermeņu kopumu, starp kuriem notiek siltumapmaiņa [5-8,15]

Izstrādātas asinhronā dzinēja siltuma režīmu pētīšanas modeļi ir parādīti zemāk (4.1.att.).



a)



b)

4.1.att.Elektrodzinēja siltuma režīma pētīšanas modeļi

Modeļa *a* strukturāla shēma atbilst sekojošam vienādojumam [5-8,15]:

$$s\bar{\theta} = \frac{1}{T_{\theta}} \Delta\bar{P}_n - \frac{1}{T_{\theta}} \bar{\theta} \quad (4.1)$$

kur:

$s\bar{\theta}$ - momentāna temperatūra (*n.v.*),

T_{θ} - dzinēja silšanas laika konstante (s),

$\Delta\bar{P}_n$ - siltuma zudumu dzinējā relatīva jauda (*n.v.*),

$\bar{\theta}$ - relatīva temperatūra (*n.v.*).

Modeļa *b* strukturāla shēma atbilst vienādojumam, kas tiek uzdots pārejas funkcijas veidā [5-8, 15]:

$$\frac{s\theta(p)}{\Delta P_n(p)} = \frac{1/A}{T_{\theta}p + 1} \quad (4.2)$$

kur:

$s\theta$ - momentāna temperatūra (C°),

T_θ - dzinēja silšanas laika konstante (s),

ΔP_n - siltuma zudumu dzinējā relatīva jauda (W),

A - Siltumatdeve [J/C°].

Parametru aprēķiniem tiek izmantoti sekojoši izejdati:

P_n - nomināla jauda [W],

η - lietderības koeficients,

C_0 - tērauda īpatnēja siltumietilpība [$J/kg \cdot C^\circ$],

m_{dz} - dzinēja svars [kg],

$\theta_{\max}$ - maksimāli pieļaujams temperatūras pieaugums (kas atbilst izolācijas klasei) [C°],

θ - vides temperatūra [C°].

Parametri tika aprēķināti pēc sekojošām izteiksmēm [5-8,15]:

Dzinēja silšanas laika konstante [s]:

$$T_\theta = \frac{C}{A} \quad (4.3)$$

Dzinēja īpatnēja siltumietilpība [J/C°]:

$$C = c_0 \cdot m_{dz} \quad (4.4)$$

Siltumatdeve [J/C°]:

$$A = \frac{\Delta P_n}{\theta_{\max}} \quad (4.5)$$

Dzinēja jaudas nominālie (siltuma) zudumi [W]:

$$\Delta P_n = \frac{1-\eta}{\eta} \quad (4.6)$$

Relatīva temperatūra [n.v.]:

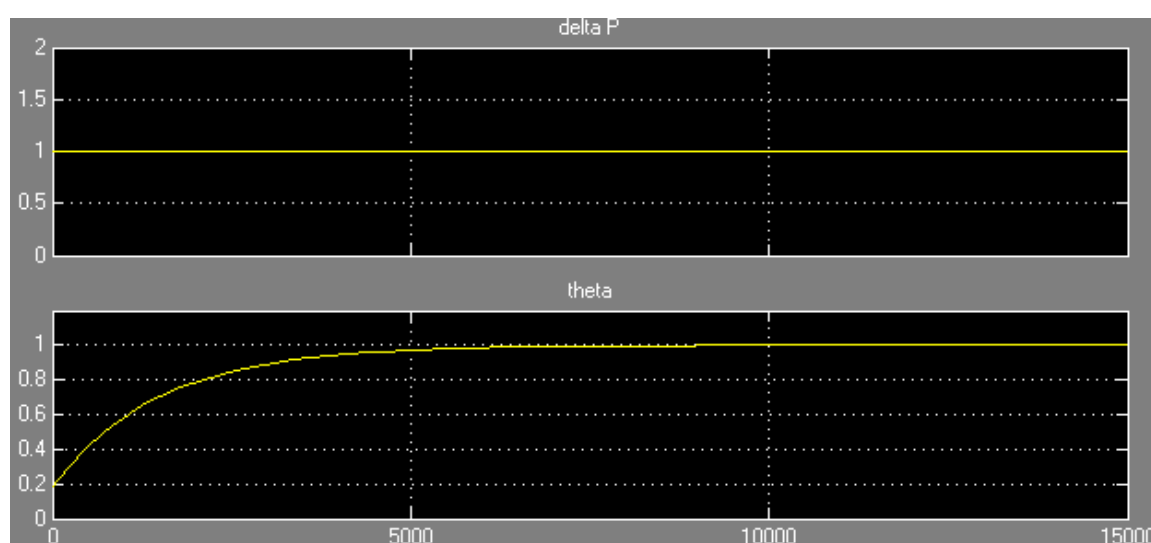
$$\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_{\max}} \quad (4.7)$$

Aprēķina izmantotie izejdati un aprēķina rezultāti ir apkopoti tabulā 4.1.

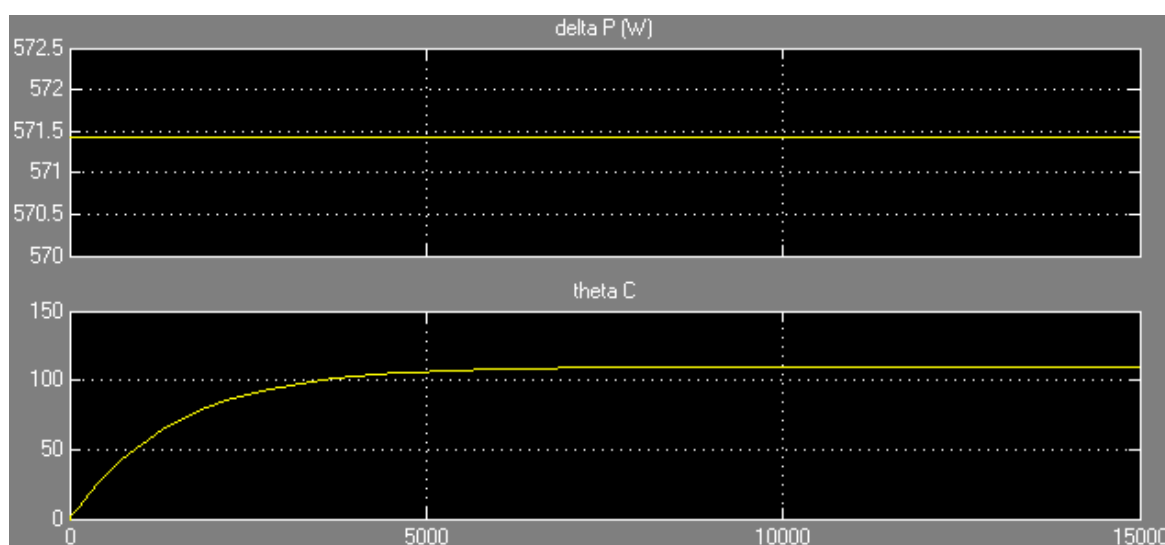
4.1.tabula. Aprēķina izejdati un iegūtie rezultāti (izmantoti asinhronā dzinēja AIP90L2 tehniskie dati)

P_n [W]	η [%]	c_0 [Dž/kg·C°]	m_{dz} [kg]	θ [C°]	θ_{max} [C°]	T_θ [s]	$\bar{\theta}$ [n.v.]	ΔP_n [W]	A [Dž/C°]
3000	84	460	16.7	20	110	1477	0.1818	571.43	5.195

Tiek pieņemts, kā lielākie dzinēja siltuma zudumi rodas pie dzinēja nomināla darbības režīma. Eksperimenta iegūtie rezultāti ir parādīti zemāk (4.2.,4.3.att.). Grafikos atspoguļoti (secība no augšas uz leju): elektriskās mašīnas jaudas zudumi (P), elektriskās mašīnas temperatūra (θ).

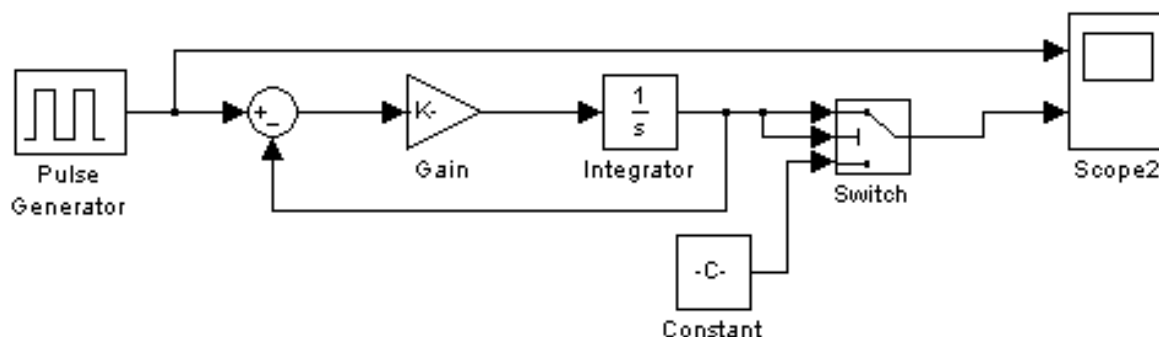


4.2.att. Asinhronā dzinēja AIP90L2 ilgstoša perioda silšanas raksturlīkne (modelis a)

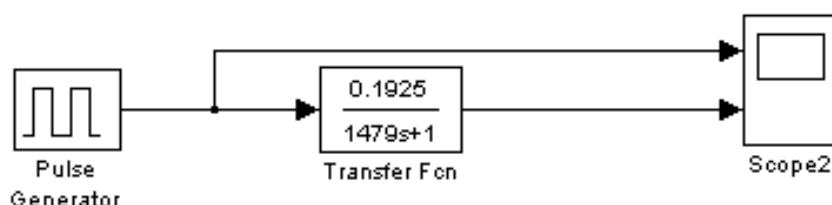


4.3.att. Asinhronā dzinēja AIP90L2 ilgstoša perioda silšanas raksturlīkne (modelis b)

Ar abu modeļu palīdzību tika iegūti vienādi rezultāti, ir redzams, ka elektrodzinēja temperatūra pieaug eksponenciāli. Ilgstoša darbība režīmā tā sasniedz stacionāro temperatūru aptuveni pēc 7000s.



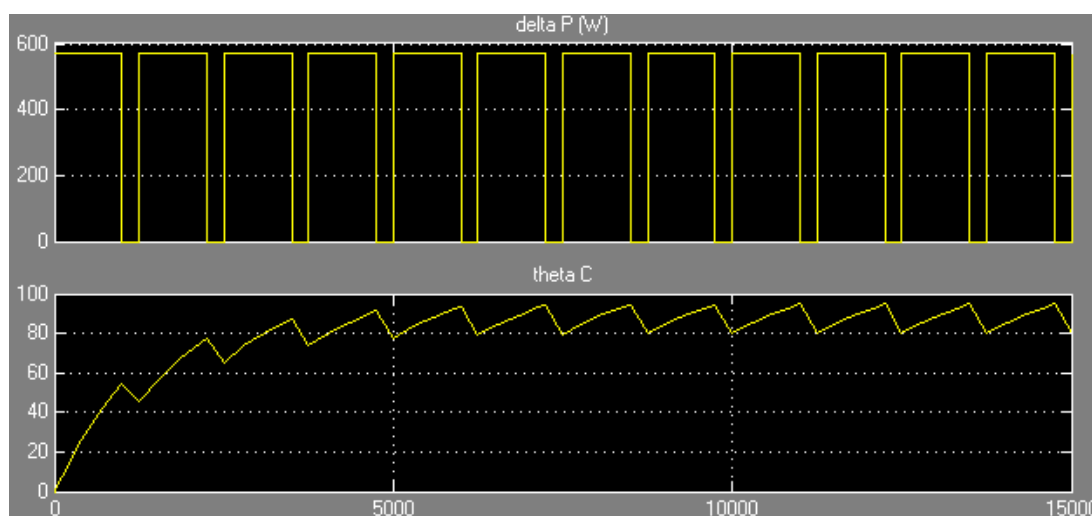
a)



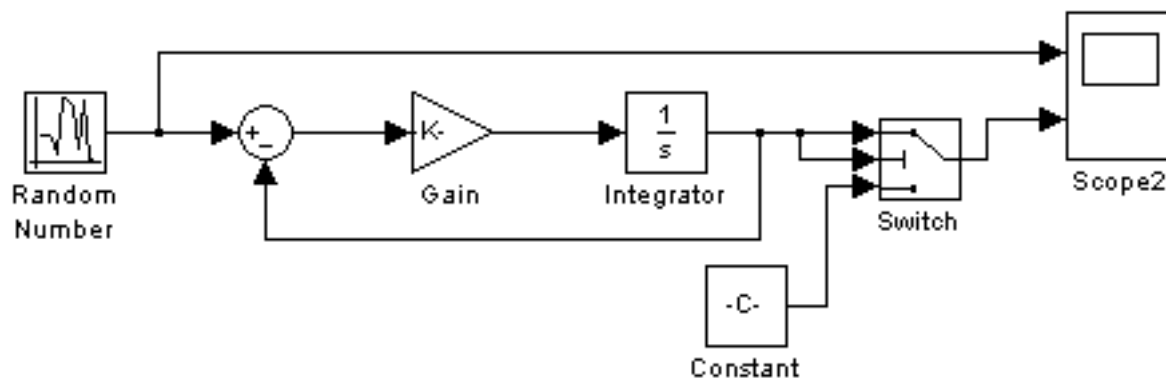
b)

4.4.att. Elektriska dzinēja siltuma režīma pie atkārtoti-īslaicīgas darbības pētīšanas modeļi

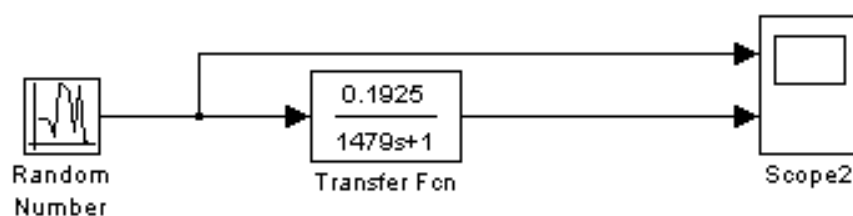
Lai modelētu atkārtoti-īslaicīgo slodzes režīmu, tika izmantots *Simulink* bloks *Pulse Generator* (4.4.att.). Ar bloka palīdzību tiek uzstādīti režīma parametri: $\Delta P_n = 571.43\text{W}$, slodzes periods 1000s, atdzišanas periods 250s. Iegūtie rezultāti parādīti attēlā 4.5.



4.5.att. Asinhronā dzinēja AIP90L2 silšanas raksturlīkne pie atkārtoti-īslaicīgas slodzes (modelis b)



a)



b)

4.6.att. Asinhronā dzinēja siltuma režīma pie mainīgas slodzes pētīšanas modeļi

Lai modelētu mainīgas slodzes režīmu, tika izmantots *Simulink* bloks *Random Number* (4.6.att.). Bloks ģenerē gadījuma signālu ar normālo sadalījumu pēc sekojoša vienādojuma:

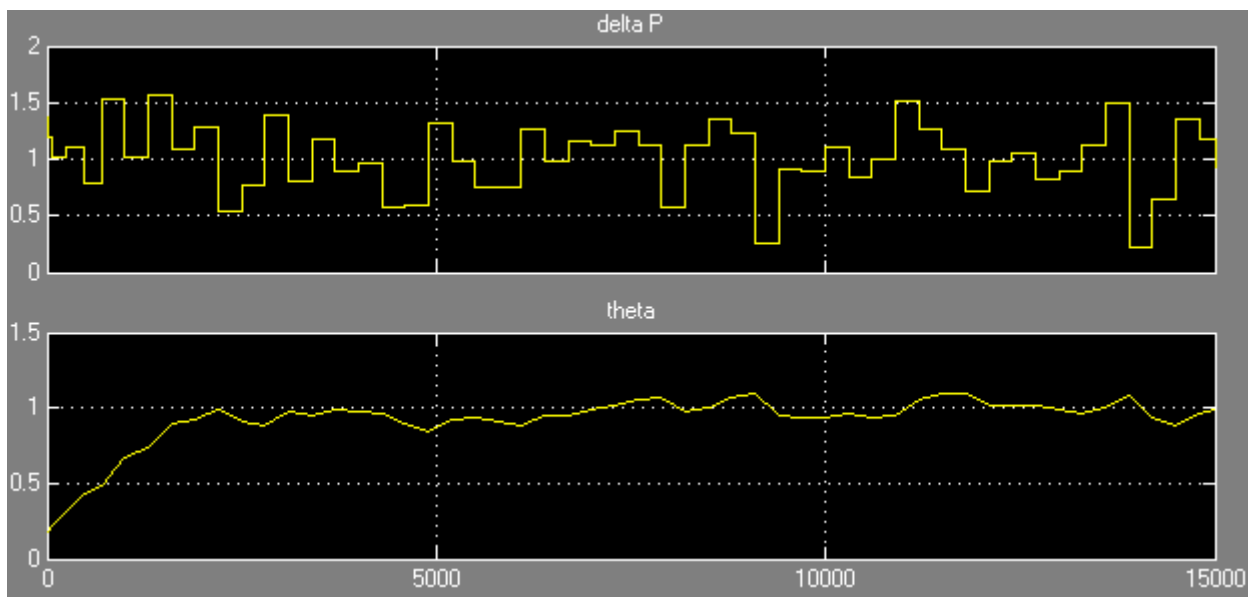
$$\Delta \bar{P}_T(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.8)$$

kur:

a - parametrs, kas noteic vislielākās varbūtības siltuma zudumu vērtību,

σ - dispersija.

Tika pieņemts, kā $a=1$ un $\sigma=0.1$. Iegūtais rezultāts parādīts attēlā 4.7.



4.7.att.Asinhronā dzinēja AIP90L2 silšanas raksturlīkne mainīgas slodzes režīmā (modelis a)

MATLAB pielikums *Simulink* atklāj jaunās iespējas maiņstrāvu un līdzstrāvu elektrisko mašīnu modelēšanā ļauj simulēt to darbību plaša diapazonā dažādos režīmos pie mainīgām slodzēm. Virtuālai modelēšanai MATLAB vidē ir būtiskas priekšrocības. Piemēram, grafiskais modelis, kas tiek veidots kā algoritmiska blokshēma, ļauj viegli mainīt sistēmas struktūru, izmainīt saites starp blokiem vai iekļaut jaunus blokus un savienot tos ar esošajiem, pieejams liels skaits standarta bloku, no kuriem var sastādīt dažādu elektropiedziņas sistēmu modeļus.

MATLAB pielikuma *Simulink* blokshēmas uzskatāmi parāda sistēmas modeļa uzbūvi, kas ļauj padziļināt sapratni par tajā notiekošajiem procesiem. Aprēķina modeļus var izmantot jebkuru asinhrono un līdzstrāvas dzinēju modelēšanai. Virtuāla modelēšana MATLAB vidē adekvāti raksturo fizikālus procesus, kuri notiek elektriskās mašīnās ekspluatācijas procesā, ļauj vizuāli analizēt elektrisko un siltuma procesu dinamiku elektropiedziņas mainīgos slodzes režīmos. Rezultātā būtiski samazinās modelēšanai nepieciešamie resursi un aprēķinam nepieciešamais laiks, tāda veida minimizējot fizikālas modelēšanas optimizācijas problēmas.

Literatūra

1. В.П. Дьяконов. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2005, 576 стр.
2. И.В.Черных. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink - <http://matlab.exponenta.ru>
3. Moskvins G. Elektropiedziņas modelēšana – Jelgava: LLU, 2008. – 51 lpp.
4. Dirba J., Ketners K. Elektriskās mašīnas. 2. izd. Rīga: RTU Izdevniecība, 2009. 534 lpp.

5. Bakshi U.A., Bakshi M.V. Electrical Machines. Technical Publications, 2009. 572 p.
6. Stephen J. Electric machinery fundamentals. 4th ed. ISBN 0-07- 246523-9, 2005, 746 p.
7. С.Г.Герман-Галкин. Электрические машины.- Санкт-Петербург, 2003, 256 стр.
8. И.В.Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink, ISBN: 978-5-97060-080-1, 2011, 288 стр.
9. А.А. Усольцев. Электрические машины. СПб: НИУ ИТМО, 2013, 416 с.
10. К. Чен, П. Джиблин. MATLAB в математических исследованиях. - Москва, 2001. - 333 lpp.
11. Гульяев А. К. Матлаб 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. Практическое пособие.- Санкт-Петербург: Корона Принт, 2001.- 400 lpp.
12. Using Simulink.- The Math Works Inc. 1999. – 605 lpp.
13. John Okyere. Electronics and circuit analysis using MATLAB.- CLC Press, 1999.
14. Finn Haugen. Modelling and control of dynamic systems. - Skien, Norway: Control Consult, 1997.- 242 lpp.
15. С.Г.Герман-Галкин. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем.- Санкт-Петербург, 2001. – 320 lpp.

Moskvins G. „Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana”- ISBN 978-9984-48-339-9 – Jelgava: LLU, 2020. – 96 lpp.

Mācību grāmata „Elektrisko mašīnu un elektropiedziņas virtuālā modelēšana” paredzēta lietišķas enerģētikas bakalauru studiju programmas studentiem, kuri apgūst teorētiskos un praktiskos pamatus mācību priekšmetā „Elektriskās mašīnas un elektropiedziņa”. Grāmata satur elektropiedziņas un elektrisko mašīnu virtuālas modelēšanas piemērus MATLAB datorprogrammu pielikuma Simulink vidē. Teorētisko jautājumu skaidrojums ir vienkāršs un viegli uztverams, jo tiek saistīts ar praktiskiem piemēriem. Izmantojot MATLAB virtuālās modelēšanas programmas un algoritmus, uzskatāmā formā ilustrējot darba un pārejas režīmu imitāciju plašā diapazonā, grāmata palīdz dziļāk saprast pielietojamo matemātisko modeļu būtību un atbilstošus fizikālos procesus, kas noriet modelējamā elektropiedziņas struktūrā ar atšķirīgiem tehniskiem un elektriskiem parametriem. Pielietojot tipveida algoritmus, var izveidot, izanalizēt un aprakstīt jebkuru elektropiedziņas darbības modeļi dažādos ekspluatācijas režīmos. Grāmata ir papildināta ar uzdevumiem, kas veicina pašvadītas mācīšanās un elektrisko mašīnu modelēšanas prasmju attīstību.

ISBN 978-9984-48-339-9

© Genādijs Moskvins

LLU_2020_Jelgava