

УКРАЇНА
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кафедра електроприводу та електротехнологій
ім. С.П. Бондаренка

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
„Моделювання регульованого електропривода”
для студентів факультету енергетики і автоматики
спеціальності 8.091903 – „Електрифікація і автоматизація
сільського господарства”

Частина I

Київ - 2010

УДК 631:371:62(73)

Наведено теоретичні основи і методичні вказівки з підготовки, проведення та оформлення лабораторних робіт з дисципліни „Моделювання регульованого електропривода” для студентів очної, заочної і дистанційної форм навчання факультету енергетики і автоматики освітньо-кваліфікаційного рівня „Магістр” зі спеціальності „Електрифікація і автоматизація сільського господарства”.

Рекомендовано навчально-методичною радою факультету енергетики і автоматики Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Укладачі: доценти, канд-ти техн. наук: **І.М.Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В.Синявський, П.В.Олійник, О.Ю.Синявський**, професор, д-р техн. наук **Л.С.Червінський**

Рецензенти: професор, д-р техн. наук **В.В. Козирський**,
доцент, канд. техн. наук **О.М.Берека**

Навчальне видання
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
„Моделювання регульованого електропривода”
для студентів факультету енергетики і автоматики
спеціальності 8.091903 – „Електрифікація і автоматизація
сільського господарства”
Частина I

Укладачі: **ГОЛОДНИЙ** Іван Михайлович,
ЛАВРІНЕНКО Юрій Миколайович,
СИНЯВСЬКИЙ Микола Володимирович та ін.

Відповідальний за випуск доц. І.М. Голодний

Зав. Видавничим центром НУБіП України
Редактор
Підписано до друку
Ум. друк. арк.
Тираж 100 пр.
Видавничий центр НУБіП

А.П.Колесніков
І.В.Сикотюк
Формат 60x84 1/16.
Обл.-вид. арк.
Зам.№

03041, Київ-41, Героїв Оборони 15.

ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Основи комп'ютерного моделювання електропривода в системі MatLab

Пакет MatLab

Перша версія пакета MatLab була розроблена більше 20 років тому назад. Нині пакет має велику бібліотеку функцій (більше 800). Ті з них, які носять більш загальний характер, входять до складу ядра MatLab. Функції, специфічні для конкретної області, включені в склад додаткових розділів, які носять назву *toolboxes*. Наприклад, повна комплектація бібліотеки Simulink вміщує близько 30 розділів інструментарію. Нижче коротко наведені ті з них, які орієнтовані на дослідження і проектування електропривода з напівпровідниковими перетворювачами.

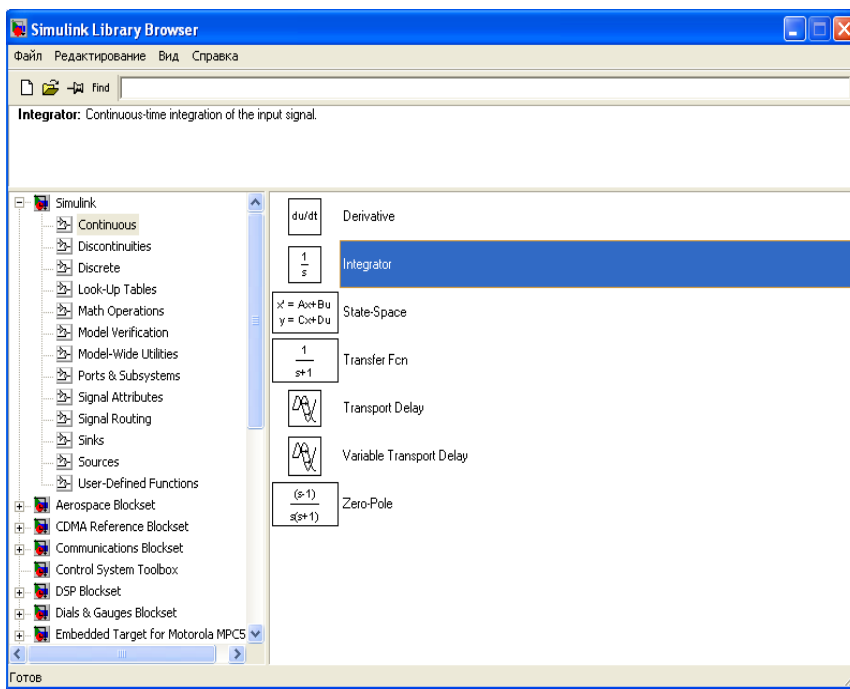


Рис. 1. Бібліотека Simulink і додаткові пакети

Бібліотека Simulink (див. рис. 1, ліве поле) являє собою набір візуальних об'єктів, використовуючи які можна дослідити кожну систему автоматичного регулювання. Для всіх блоків є можливість налаштування параметрів. Параметри налаштування відображаються в панелі вікна налаштування вибраного блока. Кнопка Help на панелі вікна налаштування відкриває детальну інформацію про блок і його параметри налаштування.

Вся бібліотека Simulink розділена на тринадцять розділів. Вміст виділеного розділу знаходиться в правому полі вікна бібліотеки. На рис. 1 – це розділ Continuous (Неперервні блоки), в якому, в свою чергу, виділений блок Integrator (Аналоговий інтегратор), опис якого знаходиться у верхньому полі.

Нижче при описі бібліотек буде наведена інформація тільки для тих блоків, які в подальшому найчастіше використовуються при моделюванні електропривода.

Continuous (Неперервні блоки)

Неперервні блоки найширше використовуються при моделюванні систем керування електроприводом. Основні з них:

Integrator – аналоговий інтегратор;

Derivate – ланка аналогового диференціювання;

Transfer Fcn – лінійна аналогова ланка, яка задана своєю передаточною функцією.

Вікно налаштування блока Integrator наведено на рис. 2, де задаються:

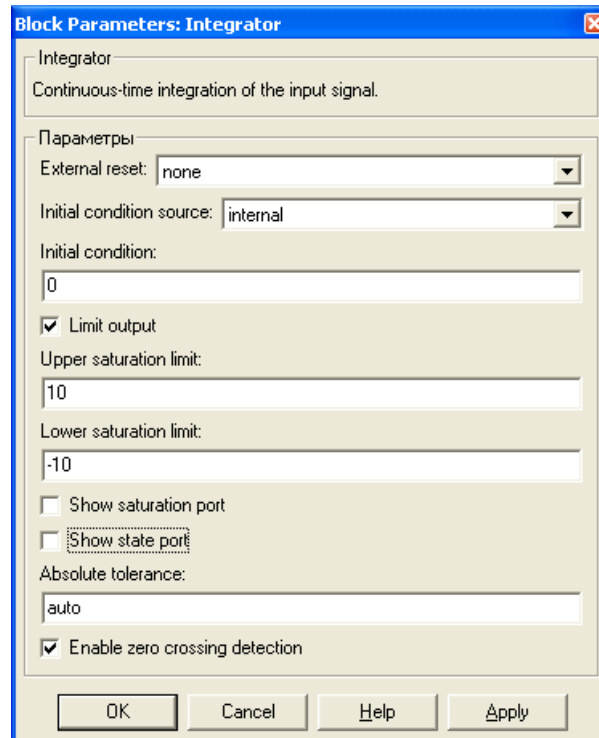


Рис. 2. Вікно налаштування інтегратора

External reset – зовнішнє скидання напруги на виході інтегратора в нуль при наростанні або зменшенні сигналу;

Initial condition source – зовнішнє установлення початкових умов;

Limit output – обмеження вихідного сигналу;

Upper saturation limits – верхній рівень обмеження;

Lower saturation limit – нижній рівень обмеження;

Show saturation port – при виборі цієї функції в зображенні блока з'являється додатковий вихідний порт. Вихідний сигнал цього порту приймає такі значення:

0 – якщо інтегратор не знаходиться на обмеженні;

+1 – якщо вихідний сигнал інтегратора досяг верхньої обмежуючої межі;

-1 – якщо вихідний сигнал інтегратора досяг нижньої обмежуючої межі.

Show state port – Відобразити (галочка)/приховати порт стану блока. Цей порт використовується для створення зворотного зв'язку в цьому інтеграторі.

Блок передаточної характеристики Transfer Fcn, який найбільше використовується при моделюванні систем автоматичного регулювання електропривода, задає передаточну функцію у вигляді відношення полінома:

$$W(s) = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0},$$

де p – оператор Лапласа; $m, m-1$ і $n, n-1$ – показники степеня полінома в чисельнику і знаменнику; a_m, a_{m-1}, a_1, a_0 і b_n, b_{n-1}, b_1, b_0 – коефіцієнти полінома в чисельнику і знаменнику.

Вікно налаштування блока Transfer Fcn наведено на рис. 3. Коефіцієнти чисельника цієї функції a_i необхідно ввести в поле **Numerator**, розпочинаючи з коефіцієнта a_m при старшому показнику степеня. Аналогічно заповнюється поле знаменника передаточної функції **Denominator**, розпочинаючи з коефіцієнта b_n . Причому, порядок степеня чисельника не повинен бути більшим порядку степеня знаменника.

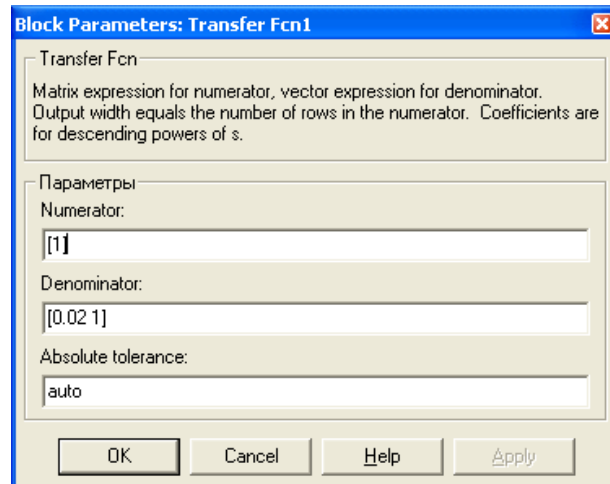


Рис. 3. Панель настроювання Transfer Fcn

Math (Математичні функції)

Основні блоки бібліотеки Math:

Sum – аналоговий суматор, який дозволяє алгебраїчно додавати довільну кількість сигналів;

Product – формує на виході результат множення або ділення двох і більше вхідних сигналів. У вікні настроювання параметрів вказується число входів і вид виконання операції (рис. 4);

Gain – аналоговий підсилювач;

Mat Function Блок дозволяє вибрати одну із математичних функцій в полі настроювання і включити її в модель.

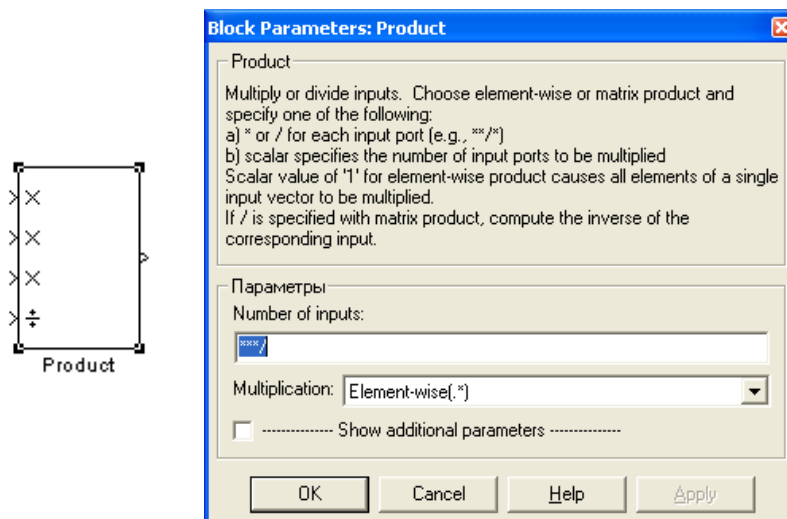


Рис. 4. Блок Product і вікно його настроювання

Sinks (Віртуальні прилади для спостереження і реєстрації процесів)

До складу віртуальних приладів входять (рис. 5):

Scope – осцилограф для спостереження залежностей у часі;

XY Graph – графопобудовник у системі полярних координат;

Display – пристрій для виведення на екран дисплея.

Sources (Джерела сигналів)

Склад цього розділу наведено на рис. 6.

Набір блоків практично вміщує всі необхідні джерела сигналів для дослідження електропривода. З кожним графічним елементом зв'язано вікно налаштування.

Вікно настройки Step показано на рис. 7. На полях налаштування задаються момент подачі сигналу (Step time), початкові значення сигналу (Initial value), кінцеві значення сигналу (Final value).

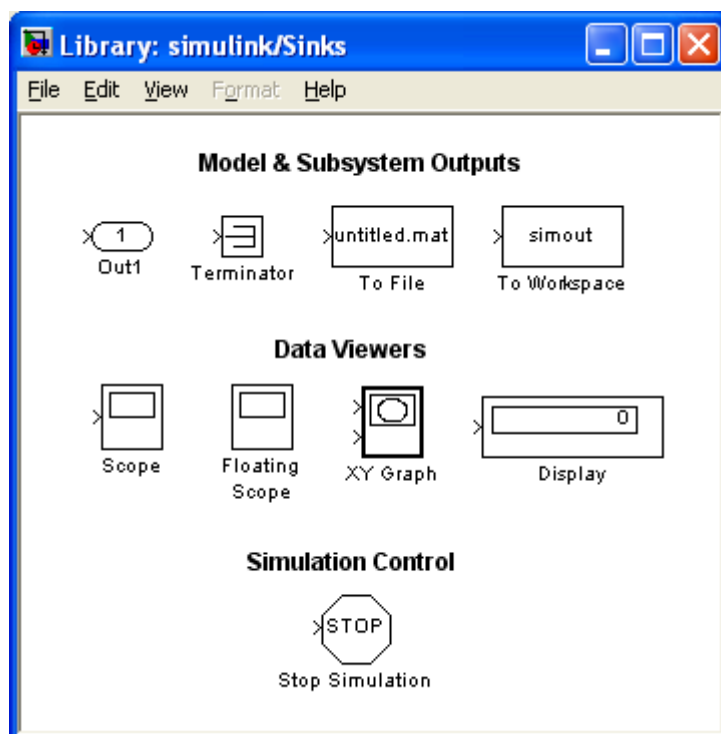


Рис. 5. Бібліотека Sinks

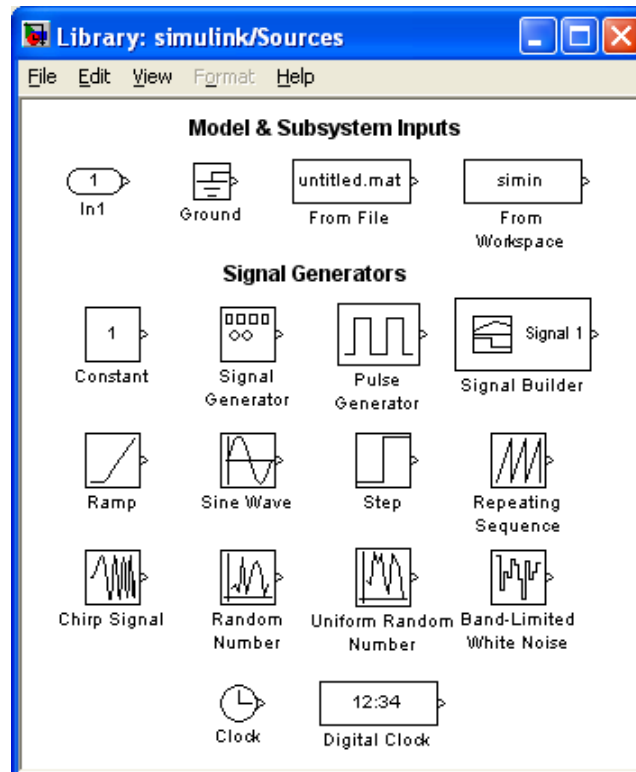


Рис. 6. Бібліотека Sources (Джерела сигналів)

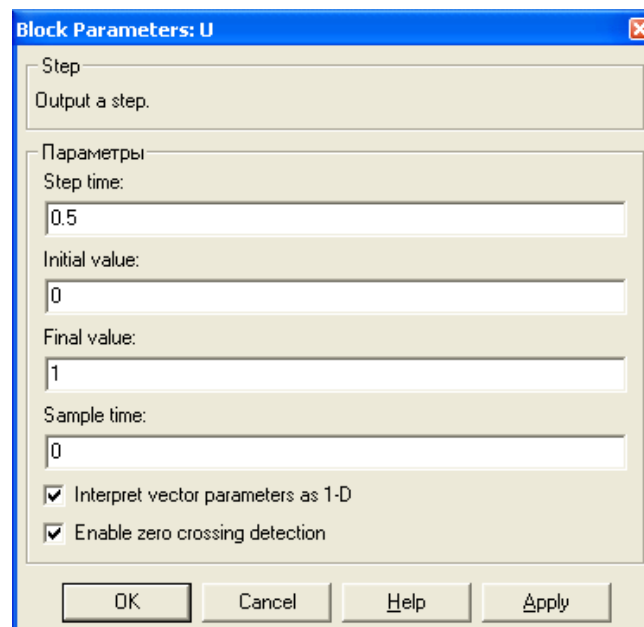


Рис. 7. Вікно налаштування блока Step

SimPower Systems Elements (Бібліотека пасивних силових елементів)

Основні з них наведені на рис. 8.

1. Послідовні і паралельні пасивні елементи R, L, C, які можуть бути задані величинами їх параметрів Ом, Гн, Ф (RLC Branch), або активною, реактивною індуктивною чи реактивною ємнісною потужністю (RLC Load).

2. Лінійний трансформатор (Linear Transformer) і трансформатор з реальним магнітним осердям, в якому враховано його насичення (Saturable Transformer).

3. Однофазні і трифазні лінії електропередачі (PI Section Line).

4. Трифазний двообмотковий і триобмотковий трансформатори (Three-Phase Transformer – Two windings; Three windings).

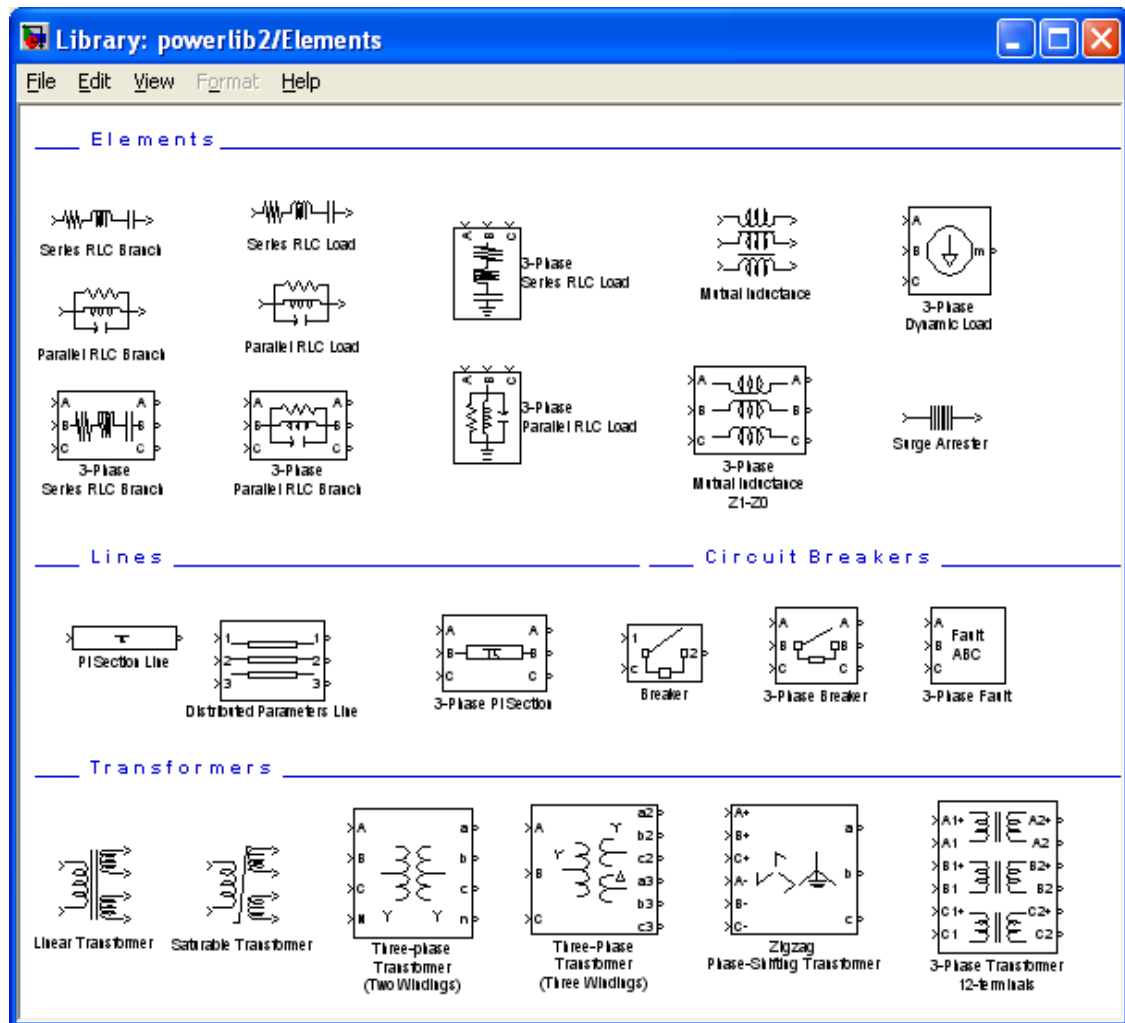


Рис. 8. Бібліотека SimPower Systems Elements

Power Electronics (Бібліотека силових елементів напівпровідникових перетворювачів)

Ця бібліотека (рис. 9) вміщує сім типів одиничних силових елементів і моделі різних напівпровідникових перетворювачів, які показані одним універсальним блоком (Universal Bridge).

Кожний одиничний напівпровідниковий елемент має вихід „m”, на якому можна подивитися форму напруги і струму на елементі та заміряти їх значення, а виходи “a” і “k” належать аноду і катоду. Всі блоки мають управляючий вхід „g”.

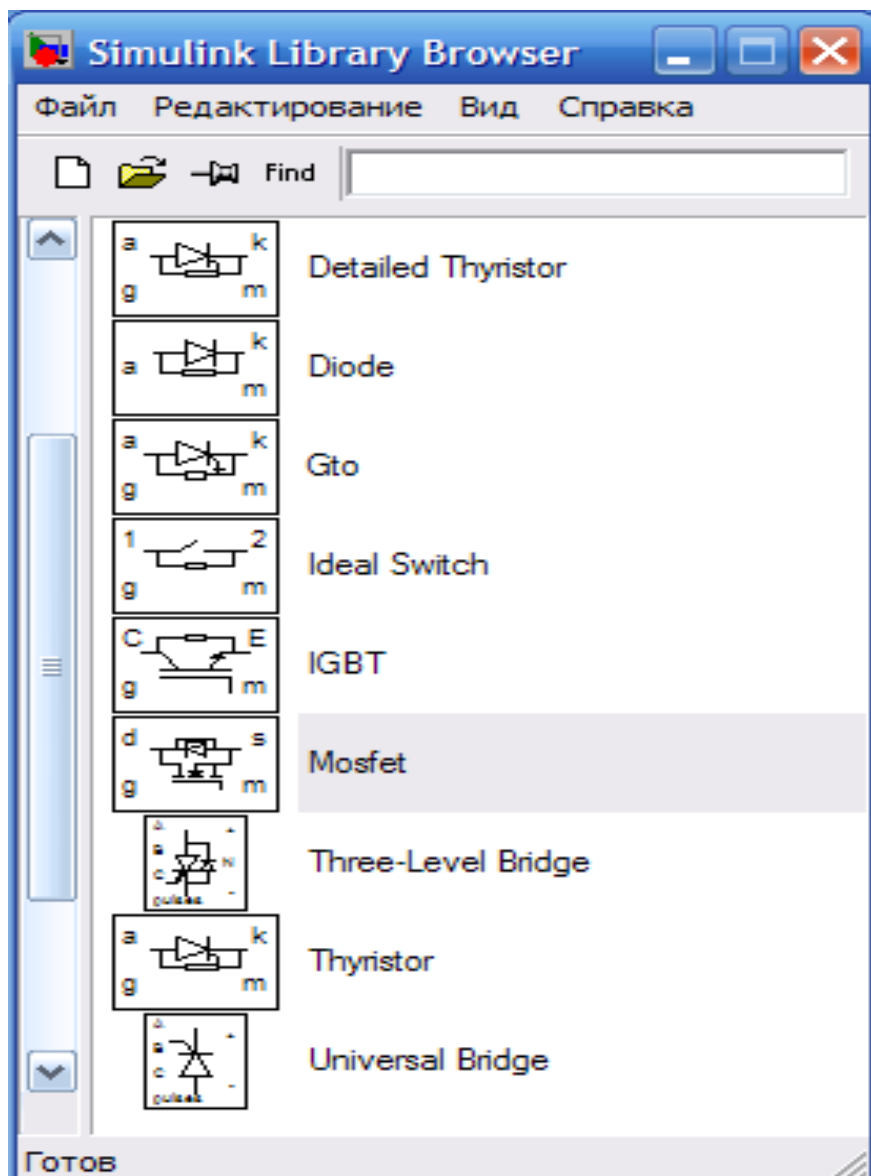


Рис. 9. Бібліотека Power Electronics

Універсальний напівпровідниковий перетворювач наведений на рис. 10, у полях вікна налаштування якого задаються:

- кількість плечей універсального мосту (Numbers of bridge arms);
- конфігурація вхідних і вихідних портів (Port configuration). Вхідними можуть бути АВС, а вихідними – порти +, -;
- тип силового напівпровідника (Power Electronic device);
- параметри кіл формування траєкторії перемикачання задаються в полях Snubber resistance, Snubber capacitance.
- поле Measurement призначено для вибору вимірюваних змінних величин універсального напівпровідникового мосту.
- управляючий вхід “pulses”.

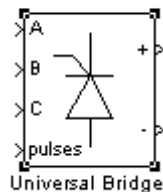


Рис. 10. Блок Universal Bridge та його вікно налаштування

Machines (Бібліотека електричних машин)

Ця бібліотека (рис. 11) вміщує синхронні, асинхронні машини і машини постійного струму. Параметри електродвигунів можуть бути подані як в абсолютних одиницях, так і у відносних. Універсальний блок вимірювання (Machines measurement) дозволяє вимірювати необхідні змінні величини двигуна.

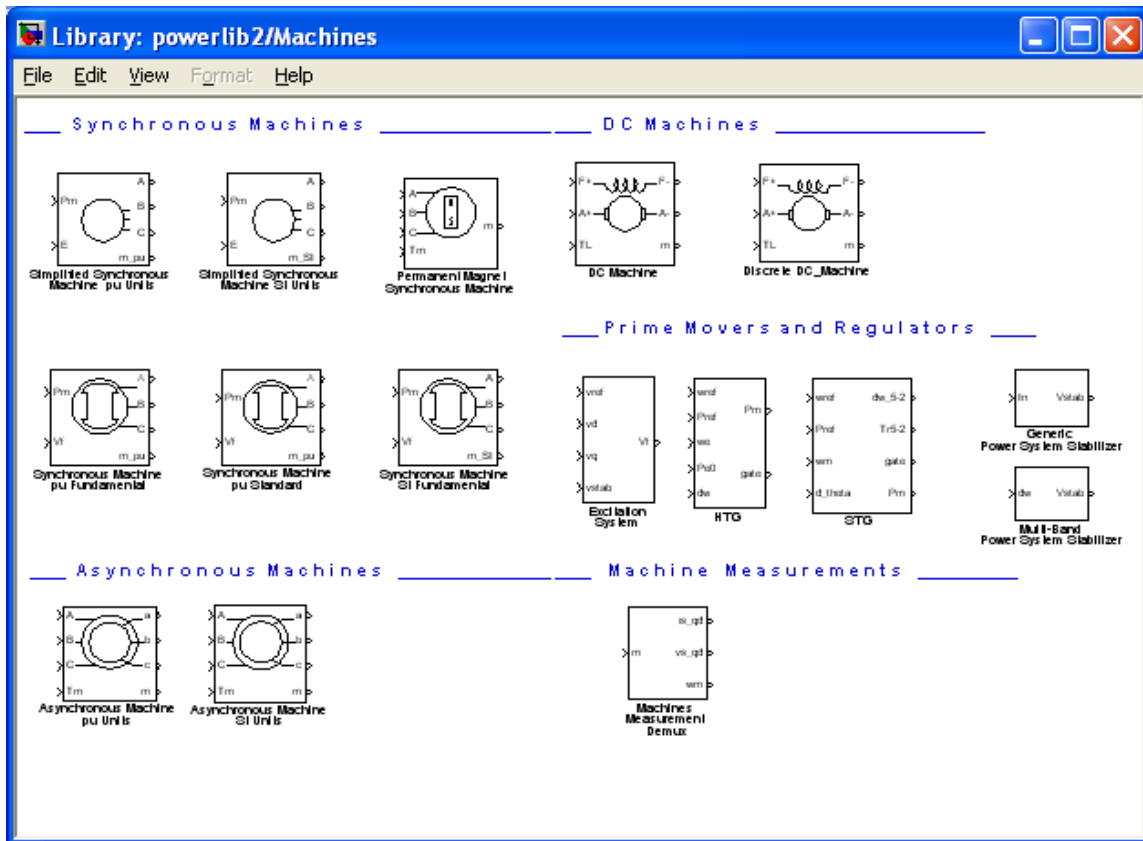
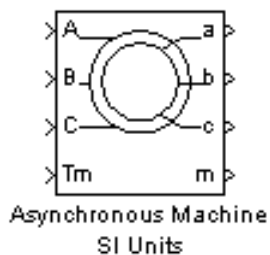


Рис. 11. Бібліотека Machines

Для прикладу на рис. 12 наведена модель асинхронної машини і панель її налаштування:

- перше поле налаштування – тип ротора;
- друге поле – координатна система відліку;
- третє поле – потужність, діюче значення лінійної напруги;
- четверте, п'яте і шосте поле – параметри класичної схеми заміщення (активні опори та індуктивності);
- сьоме поле – момент інерції ротора; коефіцієнт тертя; число пар полюсів;
- восьме поле – початкові умови (ковзання, положення ротора, струм статора та їх початкові фази).



Параметры

Rotor type: **Wound**

Reference frame: **Rotor**

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:
[3*746, 220, 60]

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:
[0.435 2.0e-3]

Rotor [Rr(ohm) Llr(H)]:
[0.816 2.0e-3]

Mutual inductance Lm (H):
[69.31e-3]

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:
[0.089 0 2]

Initial conditions (read the details in the description above)
[1,0 0,0,0 0,0,0]

Рис. 12. Блок Asynchronous Machine та його вікно налаштування

Побудова моделей у системі MatLab

Виділення об'єктів

Щоб виділити окремий об'єкт, необхідно лівою кнопкою мишки натиснути один раз. У результаті по кутах виділеного об'єкта або на початку і в кінці лінії з'являться маленькі квадратні чорні мітки. При цьому всі інші раніше виділені об'єкти стануть невиділеними.

Щоб виділити декілька об'єктів, які вибрані довільно, необхідно натиснути клавішу [Shift] і, утримуючи її натиснутою, виконати натискання мишкою на кожному виділеному об'єкті. Після цього клавішу [Shift] відпустити.

Групу об'єктів можна виділити за допомогою рамки. Для цього необхідно установити курсор мишки в точку, яка буде початковою точкою рамки, натиснути ліву кнопку мишки і, не відпускаючи її, перемістити мишку в напрямку діагоналі прямокутника. В результаті на екрані з'явиться прямокутна рамка і, коли кнопка мишки буде відпущена, всі об'єкти і лінії, обведені рамкою, будуть виділені.

Якщо потрібно виділити всю модель, тобто всі об'єкти в активному вікні блок-схеми, необхідно скористуватися командою Select All (Вибрати все) із меню Edit (Правка) або комбінацією [Ctrl+A].

Операції з блоками

Копіювання блоків із одного вікна в інше проводиться так: відкривається потрібна бібліотека або вікно моделі-прототипу і потрібний блок перетягується мишкою у вікно моделі, що створюється чи редагується.

Блоки можна копіювати і за допомогою команд меню:

- у вікні бібліотеки чи моделі виділити блок (блоки), який необхідно копіювати;
- вибрати команду Copy (Копіювання) в меню Edit (Правка) активного вікна;
- зробити активним вікно, в яке необхідно скопіювати блок, і вибрати в ньому команду Paste (Вставити) із меню Edit (Правка).

Кожному скопійованому блоку Simulink надається ім'я. Користувачі можуть перейменовувати блоки. При копіюванні блок отримує ті ж самі значення параметрів, що і блок-оригінал.

Переставлення блоків моделі

Переставлення блока усередині моделі здійснюється перетягуванням його мишкою. При цьому Simulink автоматично перемальовує лінії, які зв'язують цей блок з іншими блоками. Щоб переставити декілька блоків разом із з'єднувальними лініями і зберегти відносну відстань, необхідно їх виділити і перетягти мишкою один із блоків. Всі інші виділені блоки також займуть нові місця.

Копіювання блоків однієї моделі можна виконати двома способами:

- перетягнути блок в потрібне положення, при цьому утримуючи клавішу [Ctrl];
- перетягнути блок, утримуючи натиснутою праву кнопку мишки, при цьому новому блоку надається черговий порядковий номер.

Установлення параметрів блока

Функції, які виконує блок, залежать від значень параметрів блока. Установлення цих значень здійснюється у вікні настроювання, яке викликається подвійним натисканням лівої клавіші мишки на зображенні блока в блок-схемі.

Вилучення блоків

Для вилучення непотрібних блоків із блок-схеми достатньо виділити ці блоки, як було вказано раніше, і натиснути клавішу [Del] або [Backspace]. Можна також використати команду Clear (Очистити) або Cut (Вирізати) із меню Edit (Правка) вікна блок-схеми. Якщо використана команда Cut, то в подальшому вилучені блоки можна скопіювати в модель за допомогою команди Paste (Вставити) того ж меню.

Від'єднання блоків

Щоб від'єднати блок від ліній, достатньо натиснути клавішу [Shift] і, не відпускаючи її, перетягнути блок в інше місце.

Зміна кутової орієнтації блока

У початковому стані сигнал проходить через блок зліва направо (зліва розміщуються входи блока, а справа – виходи). Щоб змінити кутову орієнтацію блока, необхідно:

- виділити блок, який необхідно повернути;
- вибрати в меню Format (Формат) вікна блок-схеми одну із команд: Flip Block (Поворот блока на 180 градусів) або Rotate Block (Поворот блока за годинниковою стрілкою на 90 градусів).

Зміна розмірів блока

Для зміни розмірів блока необхідно виділити та установити покажчик мишки на одну із кутових міток блока. Форма покажчика при цьому зміниться - він прийме вигляд двонаправленої стрілки. Необхідно захопити мишкою цю мітку і перетягнути її в нове положення.

Зміна і переміщення імені блока

Щоб змінити ім'я блока, необхідно виконати натискання мишкою на імені, а потім, використовуючи звичайні прийоми редагування, внести необхідні зміни.

Самостійно ім'я блока розміщується так. Якщо блок орієнтований зліва направо, то ім'я знаходиться під блоком, якщо справа наліво - над блоком; якщо зверху вниз або знизу вверх – справа від блока.

Змінити місцезнаходження імені виділеного блока можна двома способами:

- перенести ім'я мишкою на протилежну сторону блока;
- використати команду Flip Name із меню Format вікна моделі.

Приховати ім'я блока можна командою Hide Name (Приховати ім'я) меню Format вікна моделі, відновити – командою Show Name (Показати ім'я).

Створення з'єднувальних ліній

Щоб з'єднати вихідний порт одного блока з вхідним портом іншого, необхідно виконати такі дії:

- установити покажчик мишки на вихідний порт першого блока (при цьому курсор повинен прийняти форму перехрестя);
- натиснути ліву кнопку мишки і, утримуючи її в цьому положенні, перемістити покажчик до вхідного порту другого блока;
- відпустити кнопку мишки.

Simulink малює з'єднувальні лінії у вигляді горизонтальних і вертикальних сегментів. Щоб побудувати лінію під кутом 45° , необхідно в процесі малювання утримувати клавішу [Shift].

Створення розгалуження ліній:

- установити курсор у точку розгалуження;
- натиснути праву кнопку мишки, утримувати її натиснутою;
- провести лінію до вхідного порту потрібного блока, відпустити праву кнопку мишки.

Створення сегмента лінії:

Для створення наступного сегмента необхідно установити курсор у кінець попереднього сегмента і намалювати наступний, утримуючи ліву кнопку мишки.

Ділення лінії на сегменти:

- виділити лінію та установити курсор у точку зламу лінії;
- натиснути клавішу [Shift] і ліву кнопку мишки, курсор при цьому прийме форму кола, а на лінії утвориться злам;
- перемістити курсор (злам) в нове положення;
- відпустити клавішу [Shift] і кнопку мишки.

Розстановка міток сигналів і коментаріїв

Щоб створити мітку сигналів необхідно двічі клацнути на сегменті лінії, а потім ввести текст мітки. Подвійне клацання необхідно виконати точно на лінії, оскільки в іншому випадку буде створено коментарій до моделі.

Переміщення мітки здійснюється шляхом перетягування її на нове місце. Якщо при цьому утримувати натиснутою клавішу [Ctrl], то мітка буде скопійована в нове місце. Копіювання мітки можна здійснити подвійним клацанням на другому сегменті лінії.

Редагування мітки проводиться після клацання на ній правою кнопкою мишки.

Щоб видалити мітку, необхідно її виділити, а потім натиснути клавішу [Del] або [Backspace].

Для супроводження блок-схем текстовою інформацією про моделі створюються коментарії. Коментарії установлюються в будь-якому вільному місці блок-схеми. Після подвійного клацання мишкою у вибраному місці блок-схеми з'являється прямокутна рамка, в яку можна внести текст коментаріїв.

Копіювання, редагування, перенесення коментаріїв проводиться аналогічно міткам.

Створення підсистем

Якщо блок-схема моделі складна і має великі розміри, її можна спростити шляхом групування блоків у підсистеми:

- виділити за допомогою рамки блоки і з'єднувальні їх лінії, які необхідно включити в склад підсистеми;

- вибрати команду Create Subsystem (Створити підсистему) із меню Edit (Правка). В результаті Simulink замінить виділені блоки одним блоком Subsystem.

Щоб побачити блок схему створеної підсистеми, необхідно двічі клацнути на блоці Subsystem.

Записування і друкування моделі

Для записування моделі на диск необхідно викликати команду Save (Зберегти) або Save As (Зберегти як) із меню File (Файл) вікна моделі.

Для друку моделі використовують команду Print (Друк) із меню File (Файл) вікна моделі.

Модель можна вставити в документ якого-завгодно текстового редактора, наприклад, Word. Для цього необхідно спочатку викликати команду Copy Model (Копіюй модель) із меню Edit (Правка) вікна моделі, перенести у вікно текстового редактора і натиснути комбінацію клавіш [Shift+Ins].

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРОВАНОГО ВЕНТИЛЯ НА МОДЕЛІ В СИСТЕМІ MatLab

Програма роботи

1. Ознайомитись з програмним забезпеченням для комп'ютерного моделювання керованих вентилів.
2. Побудувати в системі MatLab модель однофазного двонапівперіодного керованого вентиля (див. рис. 1.2).
3. На моделі дослідити зовнішні, енергетичні та регулювальну характеристики однофазного керованого вентиля при роботі на активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС. і зворотним діодом.
4. Побудувати в системі MatLab модель трифазного двонапівперіодного керованого вентиля (рис. 1.17).
5. На моделі дослідити зовнішні, енергетичні та регулювальну характеристики трифазного керованого вентиля при роботі на активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС. і зворотним діодом.
6. За результатами досліджень побудувати зовнішню (навантажувальну) $U_H = f(I_H)$, енергетичні $S_1(l) = f(P_H)$, $P_1(l) = f(P_H)$, $P_T = f(P_H)$; $I_1(l) = f(I_H)$, $I_T = f(I_H)$ та регулювальну $U_H = f(\alpha)$ характеристики.

Загальні методичні вказівки

Керовані вентиля (випрямлячі) найчастіше використовують для керування двигуном постійного струму в ланці якоря. Джерелом енергії для керованих випрямлячів є мережа змінного струму. Принцип керування полягає в тому, що позитивний напівперіод живильної напруги тиристор, подібно ключу, відкривається і подає до двигуна частину напруги цього напівперіоду. Змінюючи момент (фазу) відкриття тиристора, змінюють середнє значення напруги на якорі і таким чином керують двигуном.

Схема найпростішого двонапівперіодного керованого вентиля наведена на рис. 1.1, а. До джерела синусоїдної напруги мережі U_M з амплітудою U_m через тиристорний міст $VS1$ - $VS4$ підключено навантаження R_H . Діагональні тиристори $VS1$, $VS4$ та $VS2$, $VS3$ відкриваються попарно, по чергову в момент часу, який визначається кутом відкривання α , шляхом подачі сигналів U_1 , U_4 та U_2 , U_3 на керуючий електрод.

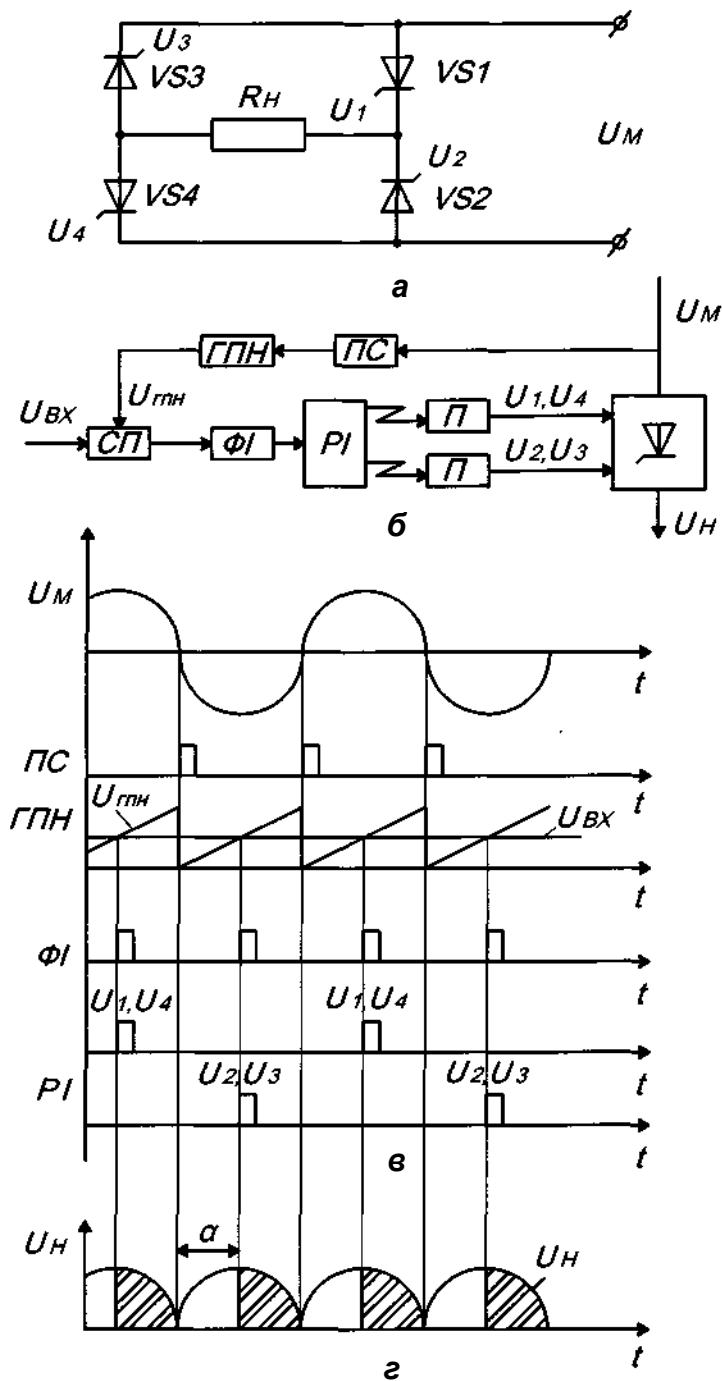


Рис. 1.1. Однофазний двонапівперіодний керований вентиль:

а – схема силового блока; *б* – схема керування вентиллями; *в* – осцилограми напруг на керуючих електродах тиристорів; *г* – осцилограма напруги на навантаженні; U_M – напруга мережі; ПС – пристрій синхронізації; ГПН – генератор пилкоподібної напруги; СП – схема порівняння; ΦI – формувач імпульсів; РІ – розподільник імпульсів; П – підсилювач імпульсів; $U_{ГПН}$ – опорна пилкоподібна напруга; U_{BX} – напруга керування; U_H – напруга на навантаженні; α - кут керування

Для керування тиристорним випрямлячем вибрано метод фазо-імпульсного керування, що базується на порівнянні опорної напруги $U_{ГПН}$ (зазвичай пилкоподібної форми) і постійної напруги сигналу керування $U_{ВХ}$. При рівності миттєвих значень цих напруг схема виробляє імпульс, підсилює і подає на керуючий електрод тиристора. Змінювання фази α керуючого імпульсу досягається зміною рівня вхідної напруги керування $U_{ВХ}$ (рис. 1.1,б).

Опорна напруга (рис.1.1,в), створена генератором пилкоподібної напруги $ГПН$ і синхронізована з напругою мережі за допомогою пристрою синхронізації $ПС$, подається на схему порівняння $СП$, на яку одночасно надходить і вхідна напруга $U_{ВХ}$ (сигнал керування). Сигнал із схеми порівняння надходить на формувач імпульсів ΦI , потім на розподільник імпульсів PI та кінцеві підсилювачі потужності $П$, звідки у вигляді потужного з крутим фронтом і регульованим за фазою імпульсом подається на керуючий електрод тиристора. Зазвичай між розподільником імпульсів і кінцевим підсилювачем використовують схеми гальванічної розв'язки, які на рис. 1.1,б умовно показані ламаною стрілкою.

Однією з важливих особливостей керованого випрямляча є його здатність регулювати середнє значення випрямленої напруги при зміні кута α . При $\alpha=0$ крива вихідної напруги U_H відповідає випадку некеруваного випрямляча і середнє її значення на навантаженні максимальне. При куті керування $\alpha=\pi$ тиристори закриті.

Віртуальна лабораторна установка для дослідження однофазного двонапівперіодного керованого вентиля приведена на рис 1.2.

До її складу входить:

- 1) однофазний тиристорний міст (Universal Bridge);
- 2) блок керування тиристорним мостом (Control System);
- 3) джерело синусоїдної напруги ($U=220\text{ В}$; $f=50\text{ Гц}$);
- 4) активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС (R,L), (E);
- 5) зворотний діод (Diode);
- 6) вимірювач миттєвих струмів у колах джерела живлення (I_1) і навантаження ($I\text{ Load}$);
- 7) вимірювач миттєвої напруги на навантаженні ($V\text{ Load}$);
- 8) блок для вимірювання складових гармонік струму живлення (Fourier I_1) і струму тиристора (Fourier T_0);
- 9) блок для вимірювання складових гармонік струму навантаження (Fourier I_0) і аналогічний блок для вимірювання складових гармонік напруги на навантаженні (Fourier U_0);

- 10) блок для вимірювання діючого значення струму тиристора (RMS T);
- 11) блок для вимірювання миттєвих значень струму в колі живлення, струму навантаження і напруги на навантаженні (Scope);
- 12) Multimeter - блок для вимірювання миттєвих значень величин, які вибрані в полі Measurement вікна налаштування блока Multimeter;
- 13) блок для вимірювання амплітудного значення струму і його фази в колі живлення (Display1) і блок для вимірювання середніх значень струму і напруги на навантаженні (Display);
- 14) блок для вимірювання середнього і діючого значення струму тиристора (Display2);
- 15) блок To Workspace, призначений для передачі досліджуваного сигналу в робочий простір MatLab з наступною обробкою пакетом розширення Signal Processing Toolbox для дослідження гармонічного спектра струму споживання.

На рис. 1.3 наведено вікно налаштування параметрів джерела живлення.

У полях налаштування задаються:

- амплітуда напруги, В (Peak amplitude, V);
- початкова фаза напруги, в градусах (phase, deg);
- частота струму, Гц (Frequency, Hz).

Параметр Sample time задає дискретність задавання напруги. Цей параметр є в багатьох бібліотечних блоках, він повинен бути узгоджений з часом дискретизації при установці параметрів моделювання (рис. 1.14). При моделюванні аналогових систем його можна встановити рівним нулю.

Вікно налаштування параметрів керованого вентиля наведено на рис. 1.4.

У полях налаштування задається:

- кількість плечей мосту (2) (Number of bridge arms);
- конфігурація входних і вихідних портів (Port configuration);
- параметри демпфуючих ланок (Snubber resistance, Snubber capacitance);
- тип напівпровідникових елементів в універсальному випрямлячі (Power Electronic device);
- динамічний опір напівпровідникових елементів у відкритому стані, Ом (Ron, Ohms);

- індуктивність напівпровідникових елементів у відкритому стані, Гн (Lon, H);

- порогова напруга на напівпровідниковому елементі у відкритому стані, В (Forward voltage V_f , V).

У полі Measurement вибирають величини, які вимірюються блоком Multimetr.

Параметри демпфуючих ланок визначаються за каталожними даними вибраного силового напівпровідника:

- постійна часу експоненти зростання напруги

$$\tau = \frac{0,67U_{\text{доп}}}{du/dt} \cdot 10^{-6}, \text{ с}, \quad (1.1)$$

де $U_{\text{доп}}$ – максимально допустиме повторюване миттєве значення напруги, В; du/dt – максимальна швидкість наростання прямої напруги, В/мкс;

- ємність конденсатора

$$C_d = \tau / R_H, \text{ Ф}, \quad (1.2)$$

де R_H – активний опір навантаження (двигуна), Ом;

- за умовою активний опір резистора

$$U_{\text{доп}} / R_d < di/dt, \quad (1.3)$$

де di/dt – максимальна швидкість наростання прямого струму, А/мкс.

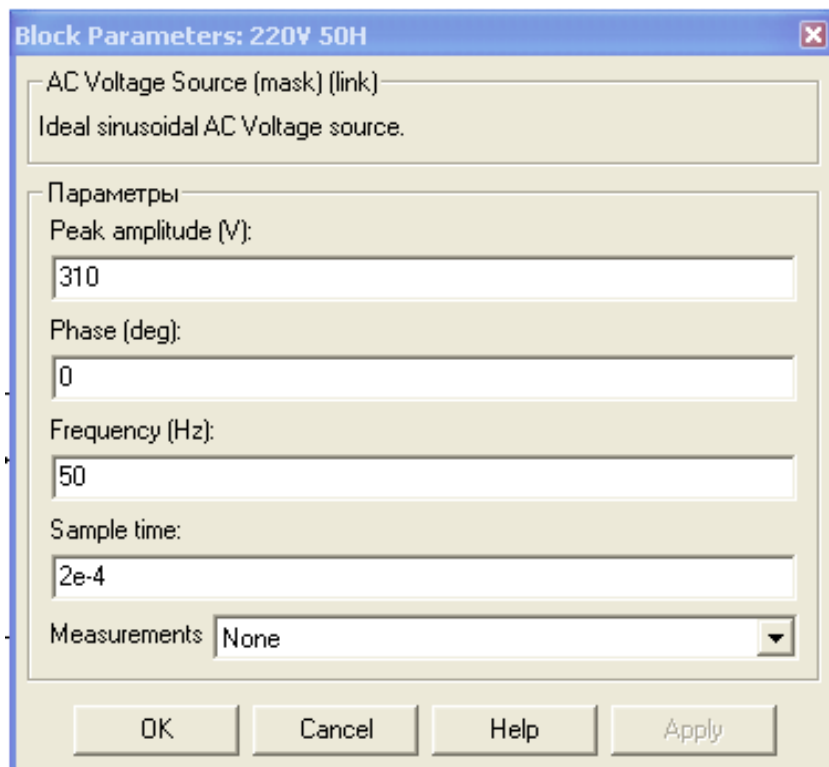


Рис. 1.3. Вікно налаштування параметрів джерела живлення

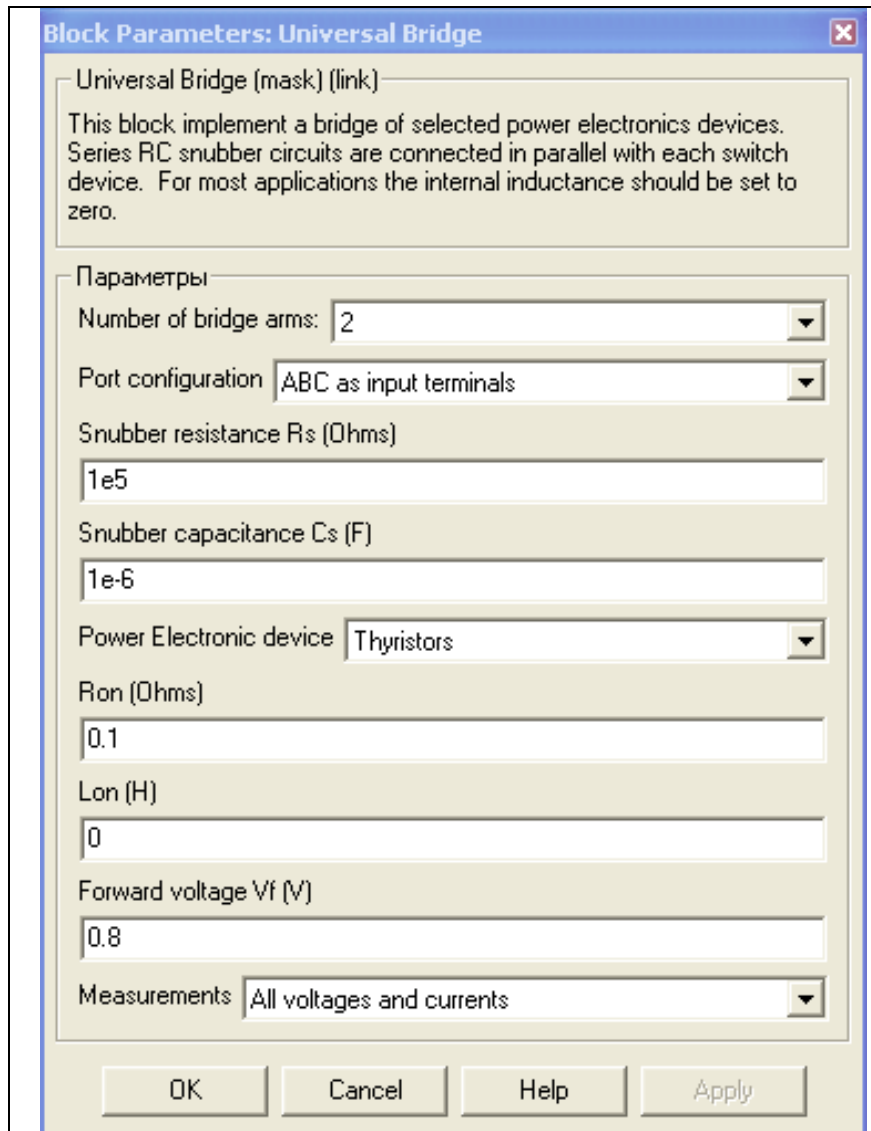


Рис. 1.4. Вікно налаштування універсального випрямляча

Модель блока керування (Control system) наведена на рис. 1.5, яка реалізована на блоках основної бібліотеки Simulink відповідно до функціональної схеми рис. 1.1. Блоки Constant, Hit Crossing, Integrator реалізують генератор пилоподібної напруги (*ГПН*, див. рис. 1.1). Цей генератор керується від мережі живлення і підключається за допомогою вхідного порту In1. Блоки Sum і Relay реалізують формувач імпульсів (*ФІ*, див. рис. 1.1), а блоки Switch, Switch1 реалізують розподільник імпульсів (*РІ*, рис. 1.1). Вихідні сигнали з цих блоків керують тиристорами через вихідні порти Out1, Out2, Out3, Out4.

Вхідний сигнал керування (U_{BX} , див. рис. 1.1) подається на схему через порт In2.

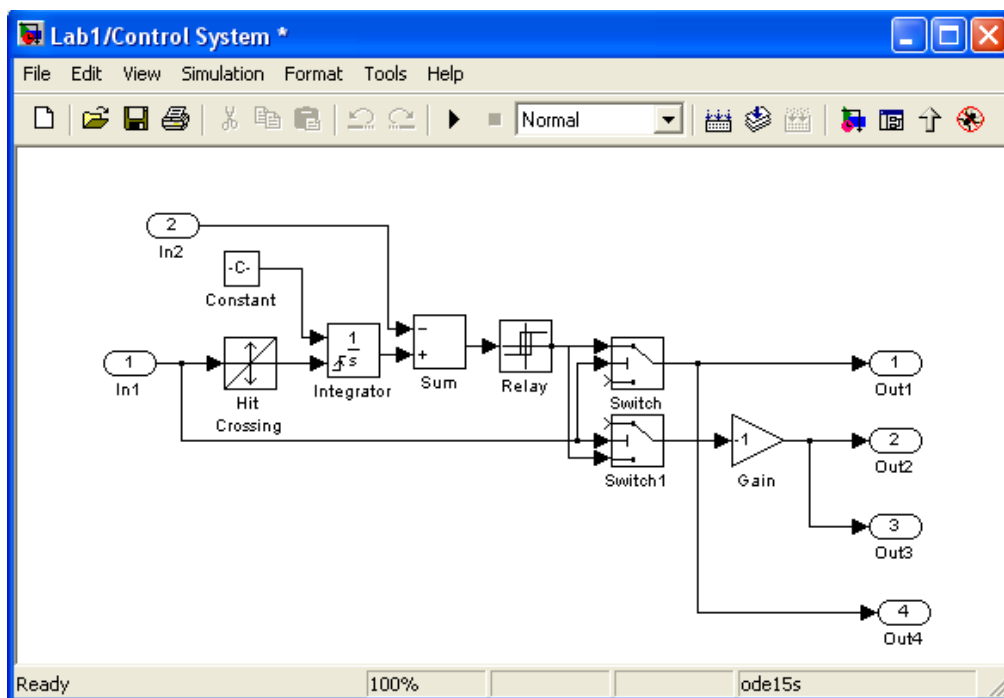


Рис. 1.5. Модель блока керування

На рис. 1.6 наведено вікно налаштування блока Hit Crossing, який призначений для визначення моменту часу, коли вхідний сигнал перетинає задане порогове значення.

У полях налаштування задається:

Hit crossing offset – Поріг, значення, перетинання якого вхідним сигналом необхідно ідентифікувати.

Hit crossing direction – Напрямок перетинання. Вибирається із списку:

rising – Зростання.

failing – Спадання.

either – Обидва напрямки.

В схемі керування вентилем (див. рис. 1.5) використано інтегруючий блок (Integrator) із зовнішнім скиданням External reset (вікно налаштування, рис. 1.7). Integrator працює так: вхідний постійний сигнал від блока Constant перетворюється інтегратором у лінійно змінний. При надходженні сигналу від блока Hit Crossing на інтегратор (порт зовнішнього скидання, f) відбувається скидання вихідного сигналу інтегратора до початкового значення, рівного нулю. В результаті на виході інтегратора формується пилоподібний сигнал, синхронізований з синусоїдою напруги джерела живлення.

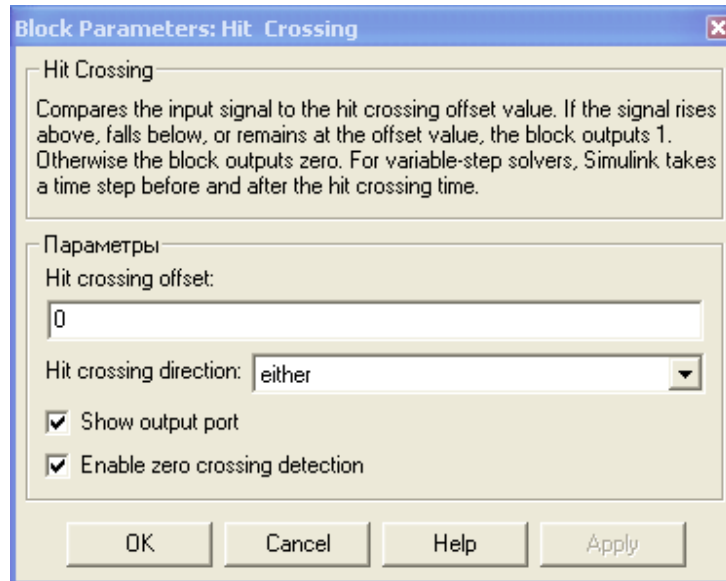


Рис. 1.6. Вікно налаштування блоку Hit Crossing

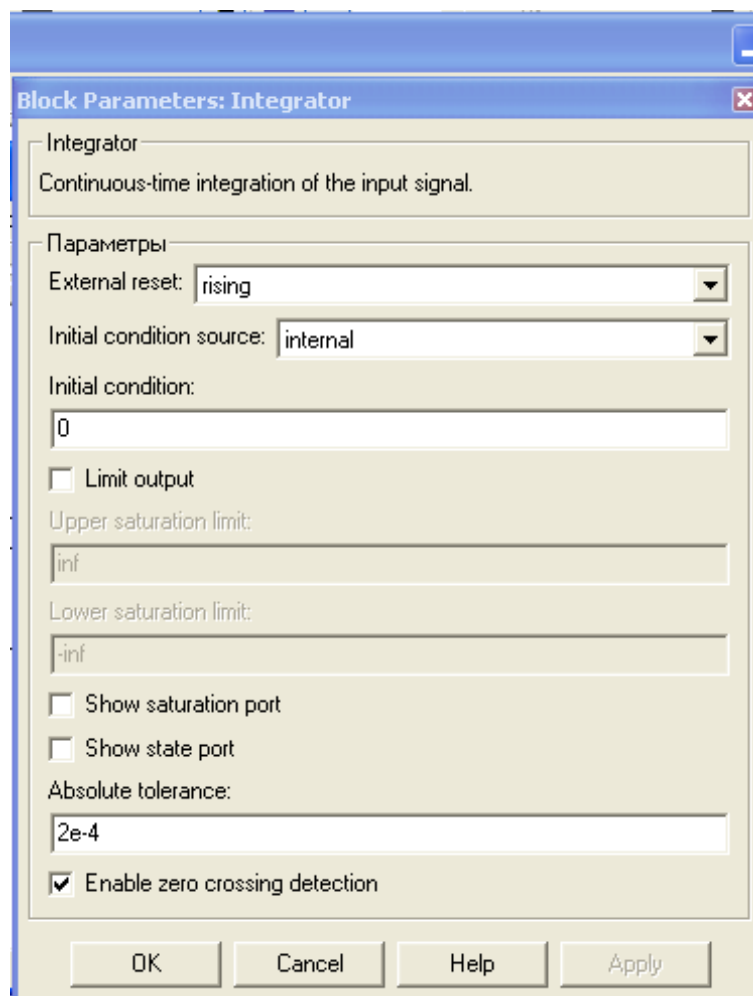


Рис. 1.7. Вікно налаштування інтегратора

Релейний блок Relay створює релейну нелінійність. Вихідний сигнал блока може приймати два значення. Одне з них відповідає ввімкненому стану реле, друге – вимкненому. Перехід від одного стану в інший відбувається стрибком при досягненні вхідним сигналом порогу вмикання або вимикання реле. В тому випадку, якщо пороги вмикання і вимикання реле мають різні значення, то блок реалізує релейну характеристику з гістерезисом. При цьому значення порогу вмикання повинно бути більшим, ніж значення порогу вимикання.

На рис. 1.8 наведено приклад роботи блока Relay. На часових діаграмах видно, що вмикання реле відбувається при досягненні вхідним сигналом величини 0,5, а вимикання при -0,5. Величина сигналу у ввімкненому стані дорівнює 1, а у вимкненому -1.

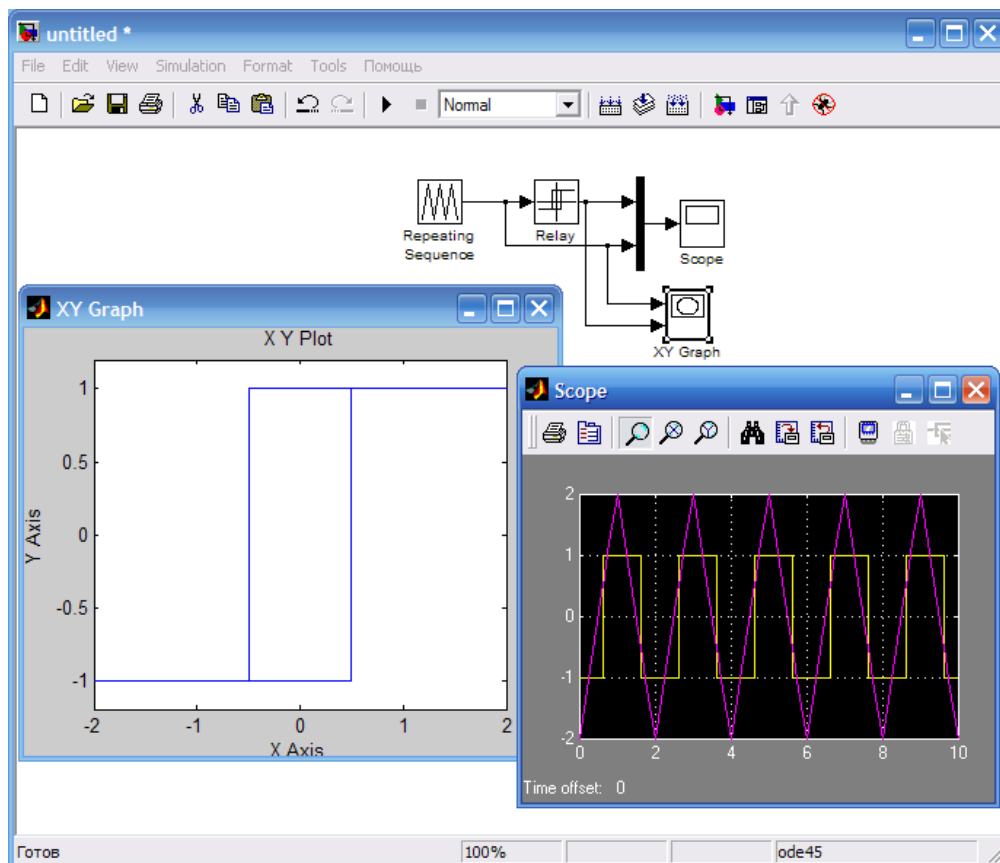


Рис. 1.8. Робота блока Relay

На рис. 1.9 показано вікно налаштування релейного блока Relay для моделі на рис. 1.5.

В полях налаштування задається:

Switch on point – Порог вмикання. Значення, при якому відбувається вмикання реле.

Switch off point – Порог вимикання. Значення, при якому відбувається вимикання реле.

Output when on – Величина вихідного сигналу у ввімкненому стані.

Output when off – Величина вихідного сигналу у вимкненому стані.

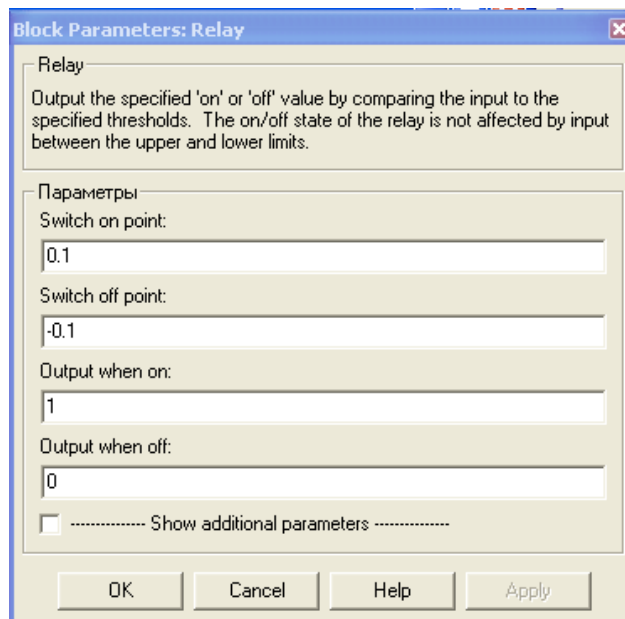


Рис. 1.9. Вікно налаштування блока Relay

На рис. 1.10 наведено вікна налаштування блоків перемикачів Switch і Switch 1, які виконують перемикання вихідних сигналів за сигналом керування.

У полях налаштування задається:

Threshold – Порог керуючого сигналу.

Блок працює так: якщо сигнал керування, що подається на середній вхід, більший за величину порогового значення Threshold, то на вихід блока надходить сигнал з першого (верхнього) входу (див. рис. 1.5). Якщо сигнал керування менший порогового значення, то на вихід блока буде надходити сигнал з другого (нижнього) входу.

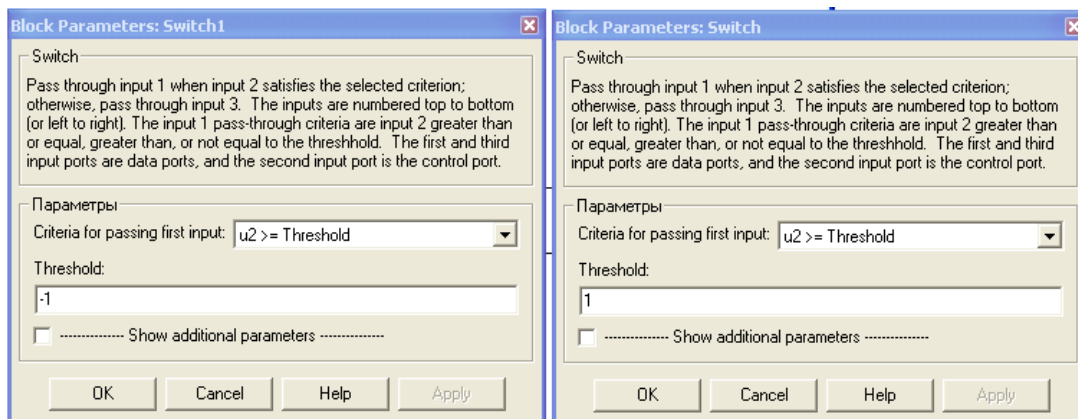


Рис. 1.10. Вікна налаштування блоків Switch і Switch 1

Вікно налаштування параметрів навантаження показано на рис. 1.11. Для реалізації активно-індуктивного навантаження в послідовній R, L, C ланці в двох перших полях (Resistance R, Ohms, Inductance L, H) встановлюються значення активного опору в омах й індуктивності в генрі, в третьому полі (Capacitance C, F) – нескінченність (inf).

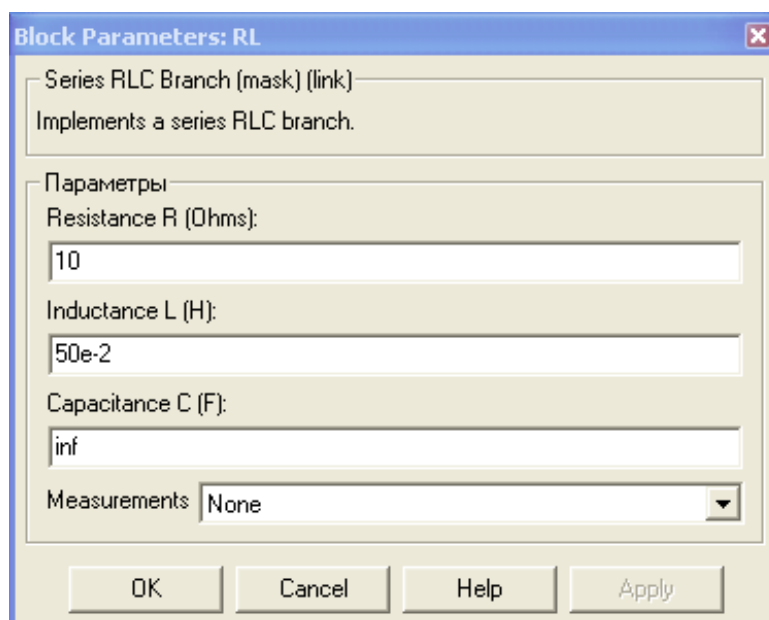


Рис. 1.11. Вікно налаштування параметрів навантаження RL

Вікно налаштування джерела постійної напруги E наведено на рис. 1.12, у полях налаштування якого задається величина вихідної напруги у вольтях (Amplitude, V).

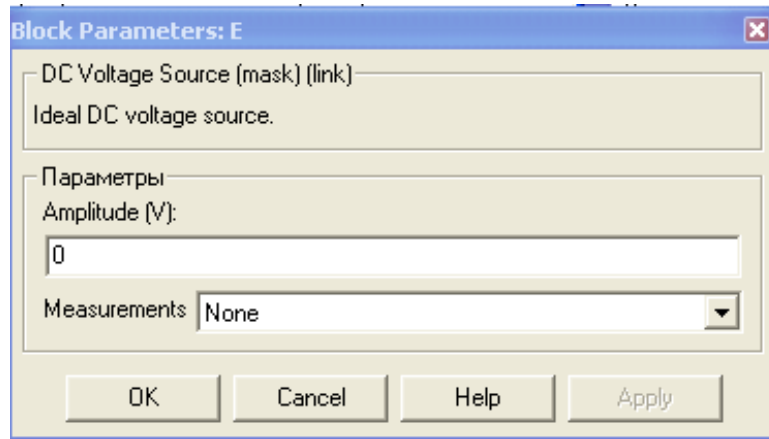


Рис. 1.12. Вікно налаштування джерела постійного струму E

У вікні налаштування параметрів блока Founer I1 (рис. 1.13) встановлюється частота живильної напруги (Fundamental frequency f1, Hz) і номер першої гармоніки (Harmonic n).

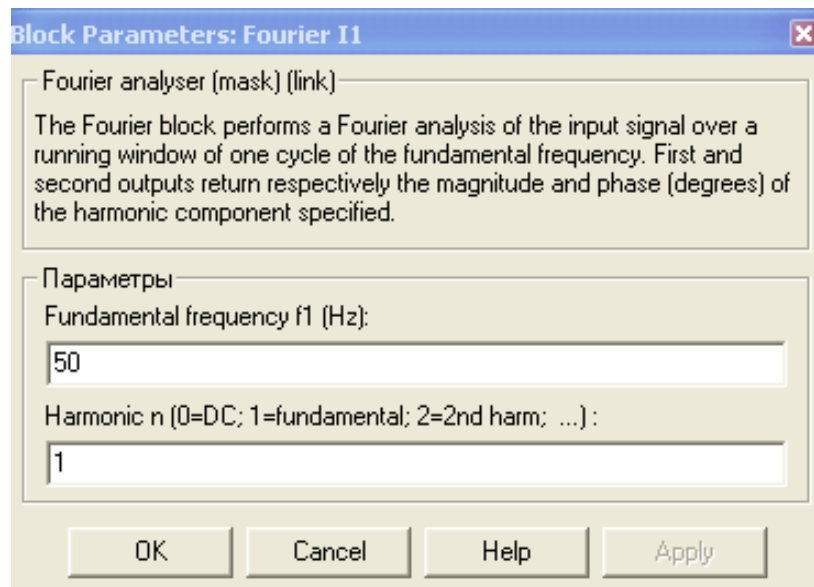


Рис. 1.13. Вікно налаштування блока Fourier I1

Блоки Fourier I0, Fourier U0 вимірюють постійні складові вихідних значень струму і напруги. При двонапівперіодному випрямленні основна частота вихідної напруги (струму) дорівнює подвоєній частоті джерела ($f=100$ Гц). У полі (Harmonic n) задається номер гармоніки. Оскільки в нашому випадку заміряється постійна складова, то $n=0$.

Вікно приладу Display, який призначений для відтворення сигналу у вигляді числа, показано на рис. 1.14. У першому полі (Format) задається формат показу вимірюваних величин, у другому (Decimation) – кратність показу вхідного сигналу, у третьому Sample time – крок модельного часу (дискретність виведення значень, що вимірюються). Параметр Sample time повинен бути погоджений з часом дискретизації при задачі параметрів моделювання (рис. 1.15). При моделюванні аналогових систем його можна встановити рівним нулю.

Параметри моделювання задаються на вкладці Simulation Parameters/Solver (рис. 1.15). У полі Stop time задається час у секундах, рівний 10...20 періодів напруги джерела живлення. В полі Type задається змінний крок (Variable-step) і метод розв'язку диференціальних рівнянь – ode 23 tb (stiff/TR-BDF2). У полі Max step size встановлюється значення кроку моделювання, це ж саме значення заноситься в поле Sample time всіх блоків, які мають це поле. В інших полях можна залишити те, що пропонує комп'ютер.

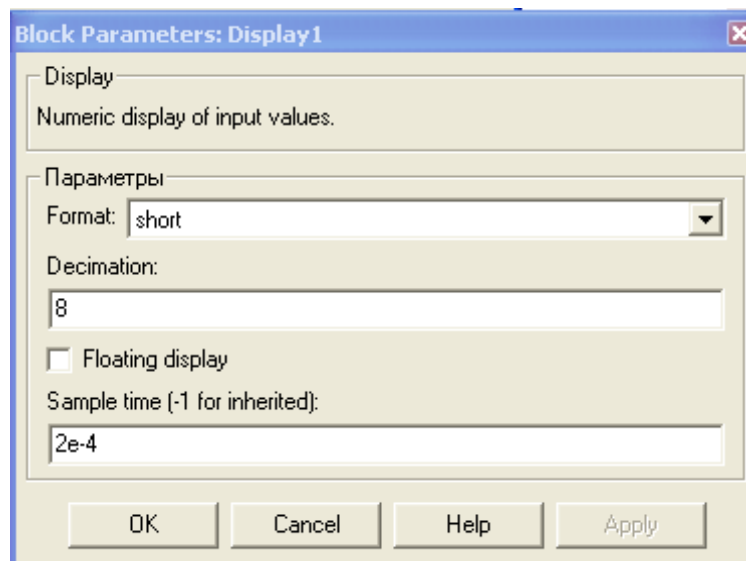


Рис. 1.14. Вікно налаштування блока Display

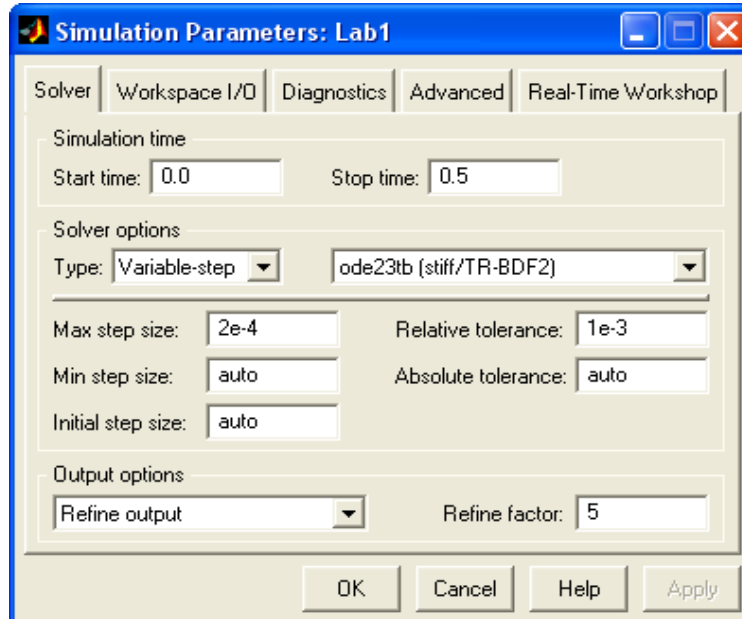


Рис. 1.15. Вікно налаштування параметрів моделювання

Вікно налаштування блока Multimeter показано на рис. 1.16. У лівому полі (Available) висвічуються всі напруги і струми універсального випрямляча, оскільки вони задані у вікні налаштування блока універсального випрямляча (див. рис. 1.4). В правому полі (Selected) відтворені ті змінні, які вимірює блок (ці значення перенесені з лівого поля в праве кнопкою „>>”). Змінні правого поля можна заміряти на виході блока зовнішніми приладами. При вмиканні Plot selected measurements миттєві значення цих величин відобразяться в графічному вікні блока після закінчення чергового моделювання.

Схема віртуальної лабораторної установки для дослідження трифазного керованого вентиля наведена на рис. 1.17.

До її складу входять:

- 1) трифазний тиристорний міст (Universal Bridge);
- 2) бібліотечний блок керування трифазним випрямлячем (Synchronized 6-Pulse Generator);
- 3) джерело трифазної синусоїдної напруги (Inductive source with neutral);
- 4) активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС (R,L), (E);
- 5) зворотний діод (Diode);
- 6) вимірювач миттєвих струмів у джерелі живлення (I1) і навантаженні (I Load);
- 7) вимірювач миттєвої напруги на навантаженні (V Load);

- 8) блок для вимірювання складових гармонік струму живлення (Fourier I1) і струму тиристора (Fourier T0);

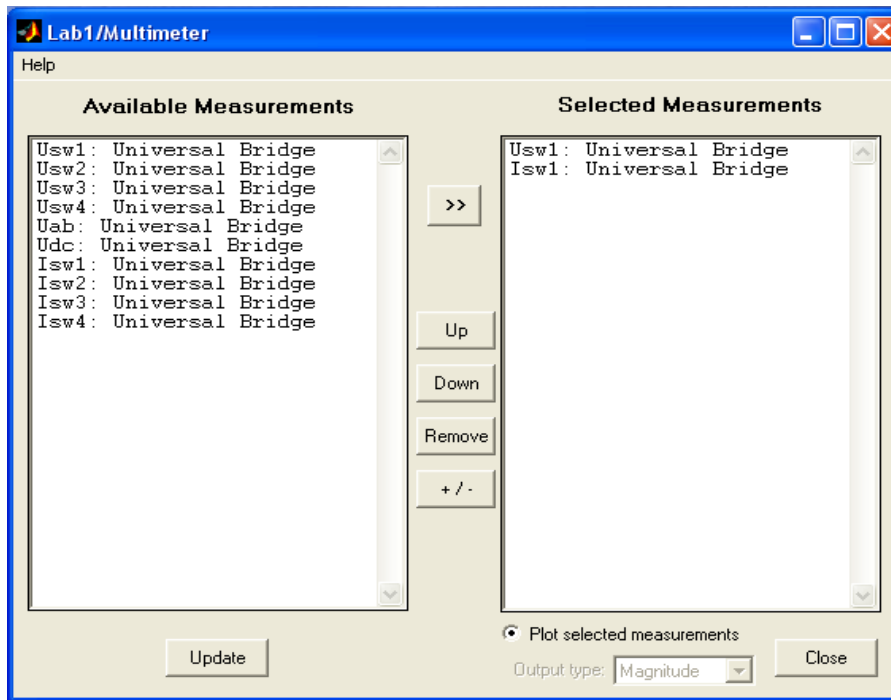


Рис. 1.16. Вікно налаштування блока Multimeter

- 9) блок для вимірювання складових гармонік струму навантаження (Fourier I0) і аналогічний блок для вимірювання складових гармонік напруги на навантаженні (Fourier U0);
- 10) блок для вимірювання діючого значення струму тиристора (RMS T);
- 11) блок для вимірювання миттєвих значень струму в колі живлення, струму навантаження і напруги на навантаженні (Score);
- 12) блок для вимірювання миттєвих значень величин, які є в полі Measurement блока Universal Bridge (Multimeter);
- 13) блок для вимірювання амплітудного значення струму та його фази в колі живлення (Display1) і блок для вимірювання середніх значень струму і напруги на навантаженні (Display);
- 14) блок для вимірювання середнього і діючого значення струму тиристора (Display2);
- 15) блок To Workspace передає досліджуваний сигнал у робочий простір MatLab з наступною обробкою пакетом розширення Signal Processing Toolbox для дослідження гармонічного спектру струму споживання.

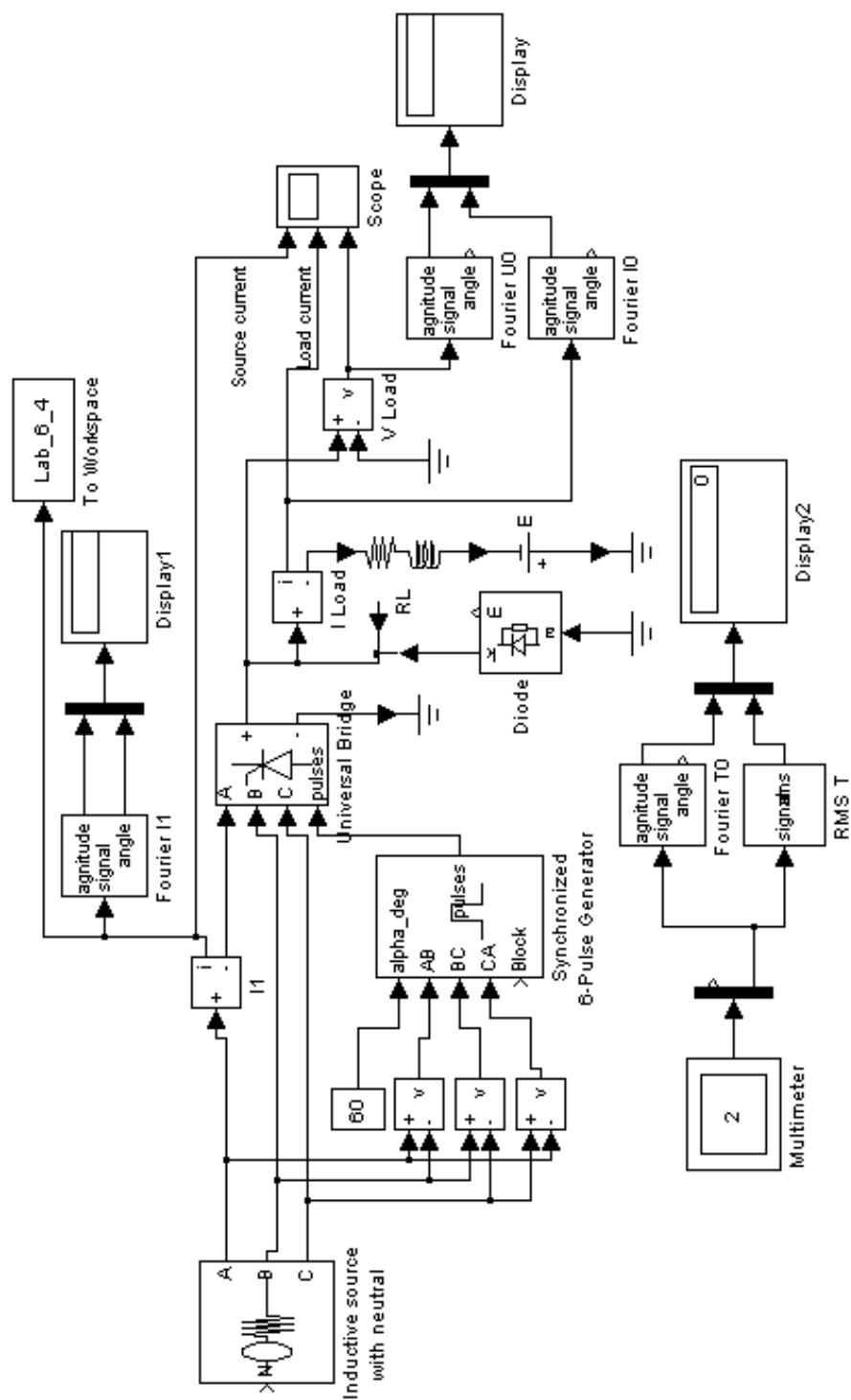


Рис.1.17. Віртуальна модель трифазного керованого вентиля

Всі перераховані блоки (крім двох перших) і їх параметри такі ж, як і при дослідженні моделі однофазного керованого вентиля.

Вікно налаштування трифазного тиристорного мосту наведено на рис. 1.18. Тут на відміну від однофазного мостового керованого випрямляча в першому полі Number of bridge arms необхідно замість цифри 2 вибрати 3.

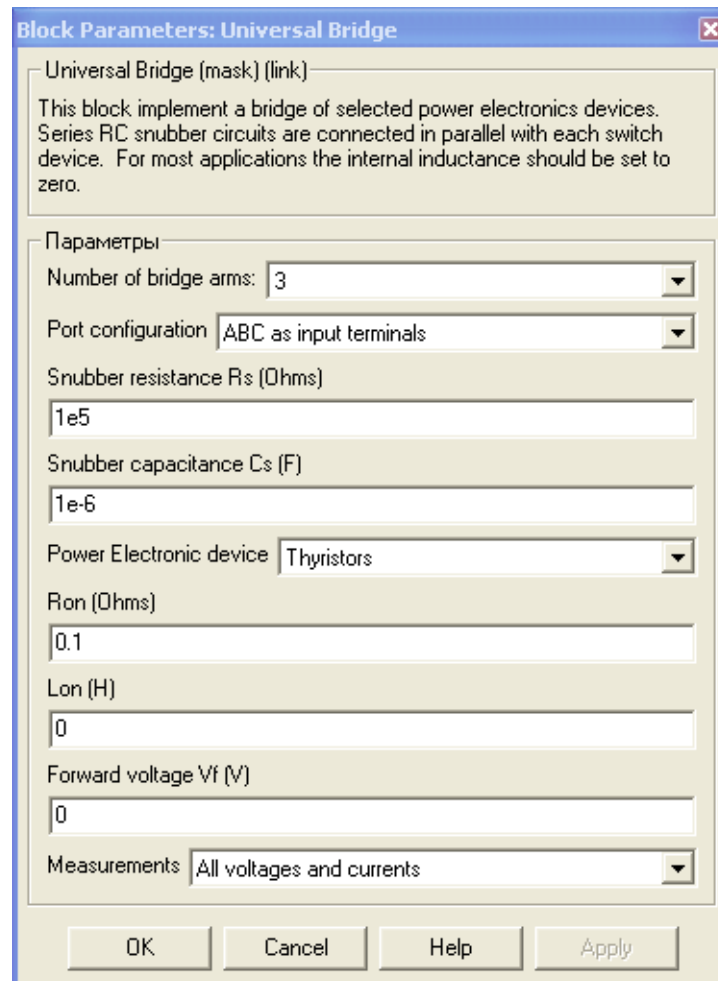


Рис. 1.18. Вікно налаштування керованого вентиля

Для керування трифазним мостовим випрямлячем використано блок Synchronized 6-Pulse Generator із бібліотеки `hjewerlib/extras/control` Blocks. На вхід блока надходять синхронізуючі сигнали від мережі живлення і сигнал задачі кута керування. Вікно налаштування параметрів блока керування наведено на рис. 1.19. У полях вікна налаштування встановлена частота мережі живлення і тривалість імпульсу керування в градусах. Останню величину необхідно

узгодити з сигналом керування (вхід alpha-deg), так, щоб сума цих кутів не перевищувала 120 градусів.

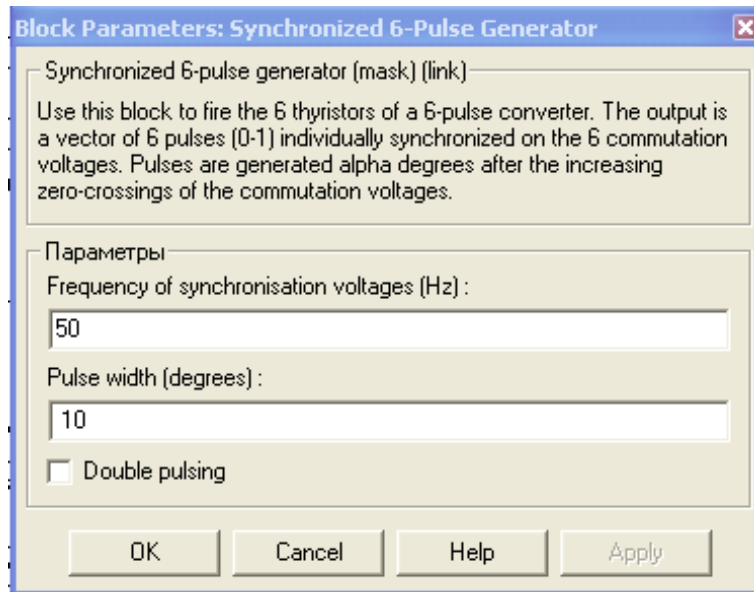


Рис. 1.19. Вікно налаштування блока керування трифазним мостовим керованим вентилям

Вказівки щодо виконання роботи

Дослідження одно- і трифазного керованих випрямлячів при роботі на активно-індуктивне навантаження із зворотним діодом за п. 3 і 5 програми роботи проводяться на віртуальних установках (рис. 1.2 і 1.17).

Параметри джерела живлення, навантаження і тиристорного випрямляча задаються викладачем.

При дослідженні зовнішніх характеристик параметри R,L навантаження залишаються без змін, змінюють тільки проти-ЕРС навантаження від 200 В до 0 з кроком 40 В. Зовнішні характеристики знімають при трьох значеннях кута керування випрямлячем ($\alpha = 0^0, 40^0, 60^0$).

При цьому моделювання проводиться для кожного значення проти-ЕРС і кута керування. Результати заносять в табл.1.1, окремо для однофазного керованого вентиля і трифазного.

1.1. Результати моделювання зовнішніх характеристик керованих вентилів

Дані		Вимірювання								Розрахунки			
α , град	E , В	I_H , А	U_H , В	$I_I(I)_{MAX}$, А	φ_1 , град	I_{TO} , А	I_T , А	$U_{D.MAX}$, В	$I_{D.MAX}$, А	$S_I(I)$, ВА	P_T , Вт	$P_I(I)$, Вт	P_H , Вт
0	200												
	160												
	120												
	80												
	40												
	0												
40	200												
	160												
	120												
	80												
	40												
	0												
60	200												
	160												
	120												
	80												
	40												
	0												

Струм I_H і напруга U_H на навантаженні визначаються за показниками Display. Амплітуду $I_I(I)_{MAX}$ першої гармоніки в джерелі живлення і початкову фазу φ_1 цього струму визначають за показами Display 1. Миттєві значення цих величин можна спостерігати на екрані осцилографа Scope (наприклад, для однофазного випрямляча, наведеного на рис. 1.20).

У графічному вікні блока Multimeter (як приклад для однофазного випрямляча показано на рис. 1.21) спостерігають і визначають максимальні значення напруги $U_{D.MAX}$ і струму $I_{D.MAX}$ тиристора керованого випрямляча. Середній I_{TO} і ефективний I_T струм тиристора визначають за показами Display 2.

Повну і активну потужність за першою гармонікою, які споживаються випрямлячем із мережі, розраховують за виразами:

для однофазного випрямляча

$$S_1(1) = \frac{U_{1.MAX} \cdot I_1(1)_{MAX}}{2}, \text{ В} \cdot \text{А}; \quad P_1(1) = S_1(1) \cdot \cos \varphi_1, \text{ кВт}; \quad (1.4)$$

для трифазного випрямляча

$$S_1(1) = \frac{3U_{1.MAX} \cdot I_1(1)_{MAX}}{2}, \text{ В} \cdot \text{А}; \quad P_1(1) = S_1(1) \cdot \cos \varphi_1, \text{ кВт}. \quad (1.5)$$

Значення максимального амплітудного значення напруги джерела живлення U_{1MAX} задають у вікні налаштування (рис. 1.3).

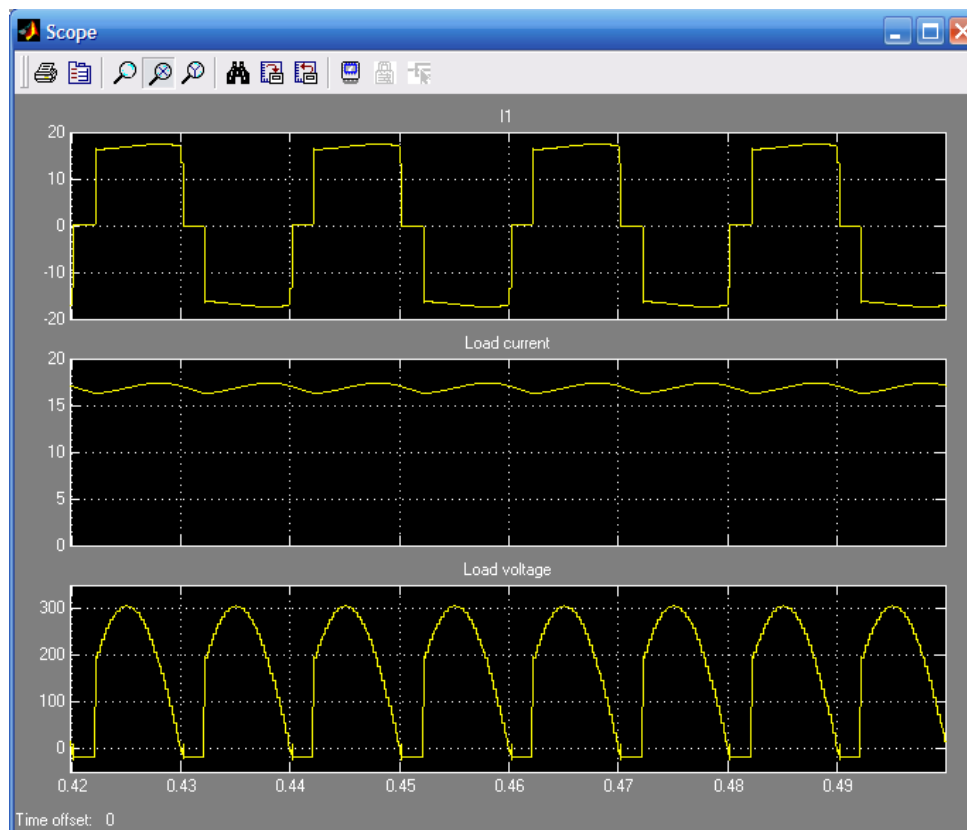


Рис. 1.20. Миттєві значення струму і напруги керованого вентиля

Потужність навантаження визначають за виразом:

$$P_H = U_H I_H, \text{ Вт}. \quad (1.6)$$

Втрати в тиристорі керованого випрямляча розраховують за формулою:

$$P_T = U_f I_{TO} + I_T^2 R_{on}, \text{ Вт}, \quad (1.7)$$

де U_f – значення порогової напруги на тиристорі у відкритому стані, задається у вікні налаштування випрямляча (Forward voltage U_f), В; R_{on} – динамічний опір тиристорів у відкритому стані, задається у вікні налаштування випрямляча, Ом.

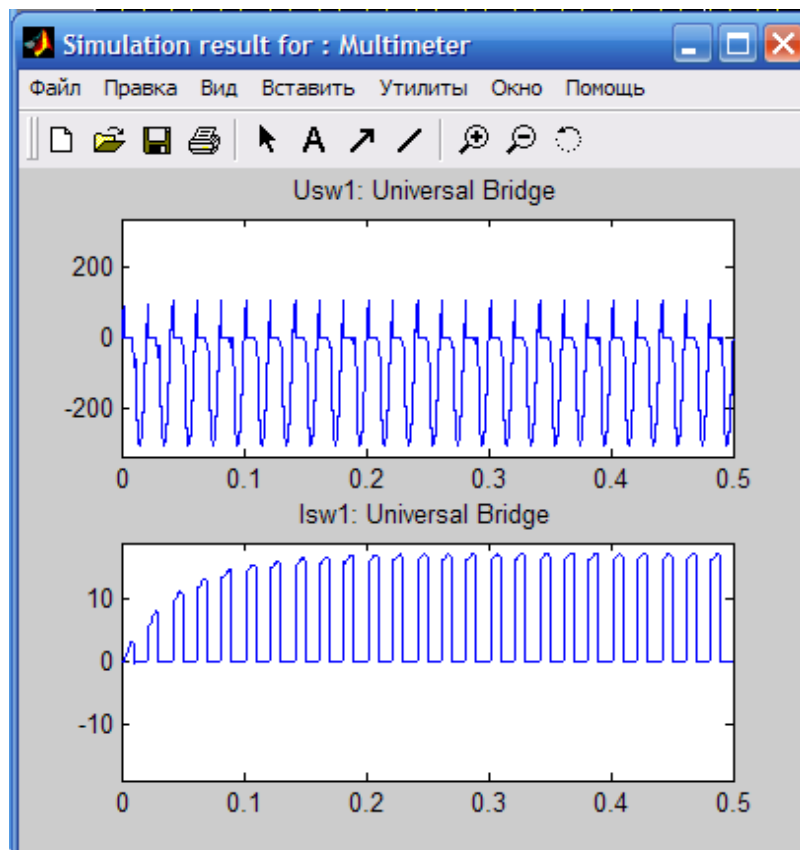


Рис. 1.21. Напруга і струм на керованому випрямлячі

За результатами табл. 1.1 будують на графіку:

- зовнішню (навантажувальну) характеристику випрямляча

$$U_H = f(I_H);$$

- енергетичні характеристики

$$S_1(I) = f(P_H); \quad P_1(I) = f(P_H); \quad P_T = f(P_H);$$

$$I_1(I) = f(I_H); \quad I_{TO} = f(I_H); \quad I_T = f(I_H).$$

Дослідження регульовальних характеристик $U_H = f(\alpha)$ керованих одно- і трифазного випрямлячів проводять на моделях (рис. 1.2 і 1.17)

при певному значенні проти-ЕРС (задається викладачем) і зміні кута керування:

для однофазного випрямляча від 0 до 180 градусів з кроком 20 градусів;

для трифазного випрямляча від 0 до 120 градусів з кроком 20 градусів.

Результати моделювання записуються в табл. 1.2.

1.2. Дослідження регулювальних характеристик керованих вентилів

Однофазний		Трифазний)	
α , градусів	U_H , В	α , градусів	U_H , В
0		0	
20		20	
40		40	
60		60	
80		80	
100		100	
120		120	
140		x	x
160		x	x
180		x	x

За результатами табл. 1.2 будують регулювальні характеристики $U_H = f(\alpha)$.

У звіті необхідно навести по одному варіанту осцилограм миттєвих значень величин I_L , I_H , U_H та напруги і струму тиристора.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОСТОВОГО ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Програма роботи

1. Ознайомитись з програмним забезпеченням для комп'ютерного моделювання широтно-імпульсних перетворювачів (ШПП).
2. Побудувати в системі MatLab модель мостового ШПП з симетричним законом керування (рис. 2.3).
3. На моделі дослідити енергетичні та регулювальні характеристики мостового ШПП з симетричним законом керування при роботі на активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС.
4. Побудувати в системі MatLab модель мостового ШПП з несиметричним законом керування (рис. 2.3), замінивши блок керування на блок, схема якого наведена на рис. 2.16).
5. Дослідити енергетичні та регулювальні характеристики мостового ШПП з несиметричним законом керування при роботі на активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС і зворотним діодом.
6. За результатами досліджень побудувати енергетичні $P_1 = f(P_H)$; $P_T = f(P_H)$; $I_1 = f(I_H)$; $I_T(RMS) = f(I_H)$; $I_T = f(I_H)$; $I_{T,MAX} = f(I_H)$ та регулювальну $U_H = f(\gamma)$ характеристики.

Загальні методичні вказівки

Широтно-імпульсні перетворювачі зазвичай використовуються в регульованих електроприводах постійного струму. ШПП перетворює постійну нерегульовану напругу від джерела живлення в постійну регульовану напругу на виході.

Принципова схема ШПП наведена на рис. 2.1. Вона складається з чотирьох транзисторних ключів $VT1-VT4$ із зворотними діодами $VD1-VD4$. У діагональ мосту, створеного транзисторними ключами, вмикається навантаження R_H , L_H та проти-ЕРС E . До клем “+” і “-” підводиться напруга від джерела живлення $U_{Ж}$.

При симетричному способі керування в стані перемикання знаходяться всі чотири транзисторні ключі мосту, а напруга на виході ШПП має вигляд прямокутних знакозмінних імпульсів. Імпульси керування транзисторами (U_1 , U_2 , U_3 , U_4) надходять одночасно на пару діагонально розміщених транзисторів, тобто відкритими можуть бути

тільки два транзистори $VT1, VT4$ чи $VT2, VT3$. Тривалість цих станів регулюється вхідним сигналом U_{BX} (рис. 2.2,б,в):

$$t_{VT1,VT4} = \gamma T; \quad (2.1)$$

$$t_{VT2,VT3} = (1 - \gamma)T, \quad (2.2)$$

де $t_{VT1,VT4}, t_{VT2,VT3}$ – час роботи транзисторів відповідно $VT1$ і $VT4, VT2$ і $VT3$; γ – відносна тривалість першого стану (змінюється від 0 до 1); T – період вихідної напруги.

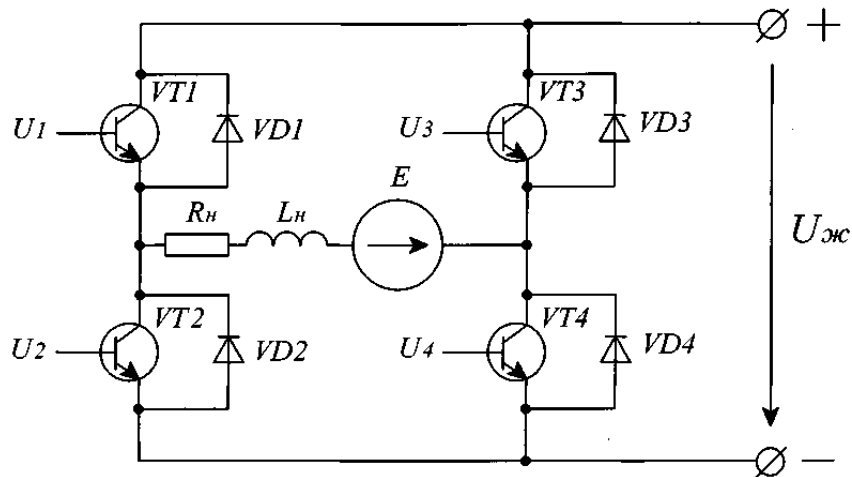


Рис. 2.1. Мостовий ШПІ

При симетричному законі керування ШПІ на навантаженні формується знакозмінна напруга, середнє значення якої визначається за виразом:

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^{\gamma T} U_{ж} dt - \frac{1}{T} \int_{\gamma T}^T U_{ж} dt = (2\gamma - 1)U_{ж}. \quad (2.3)$$

Величина U_H дорівнює нулю при $\gamma_0 = 0,5$, при $\gamma > 0,5$ - позитивна, при $\gamma < 0,5$ від'ємна.

Функціональна схема керування ШПІ за симетричним законом і осцилограми напруг наведені на рис. 2.2,а.

Генератор пилкоподібної напруги (ГПН), синхронізований генератором імпульсів (Г), виробляє пилкоподібну напругу з періодом T . Схема порівняння (СП) являє собою релейний елемент, який перемикає з плюса на мінус і навпаки в момент рівності напруги на виході ГПН і напруги на вході U_{BX} . Для керування ШПІ розподільник

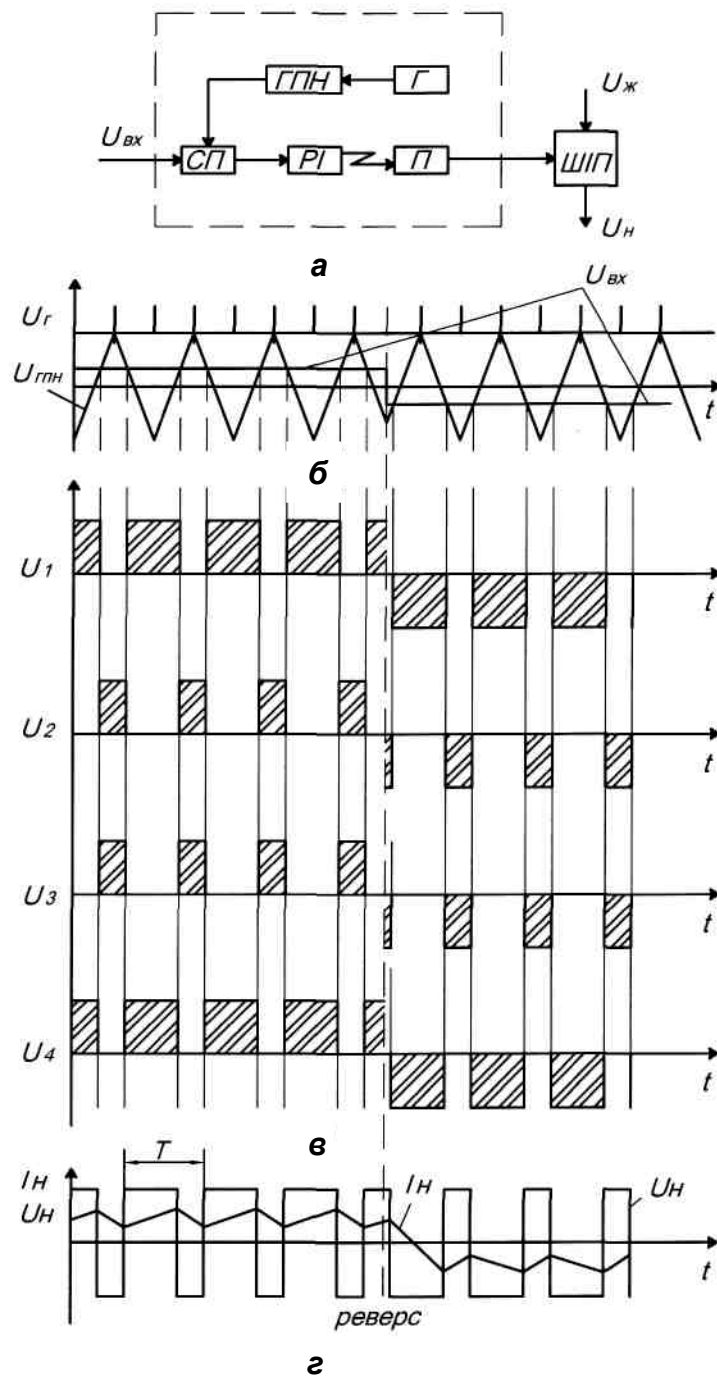


Рис. 2.2. Транзисторний ШІП з симетричним керуванням:
а – функціональна схема; **б** – осцилограми напруг керування; **в** – осцилограми напруг на транзисторних керуючих електродах; **г** – осцилограми напруги і струму навантаження

імпульсів (PI) має два виходи: один – прямий, другий – інверсний. Ці імпульси підсилюються (II), надходять на бази транзисторів, перший – на $VT1$ і $VT4$, другий – на $VT2$ і $VT3$, перемикаючи їх у протифазі.

Схема віртуальної лабораторної установки для дослідження за п. 2 програми роботи показана на рис. 2.3.

До її складу входять:

- однофазний мостовий транзисторний ШПП (Universal Bridge 2 arms);
- блок керування ШПП (Control system);
- джерело постійної напруги ($U = 240\text{ В}$);
- активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС (R, L), (E);
- вимірювач миттєвих струмів у джерелі живлення (II) і навантаженні ($I\text{ Load}$);
- вимірювач миттєвої напруги на навантаженні ($V\text{ Load}$);
- блок для вимірювання середнього значення струму живлення (Fourier II) і струму силового напівпровідникового модуля (Fourier $T0$);
- блоки для вимірювання середнього значення струму навантаження (Fourier $I0$) і середнього значення напруги на навантаженні (Fourier $U0$);
- блок для вимірювання діючого струму силового напівпровідникового модуля ($RMS\ T$);
- блок для вимірювання миттєвих значень струму в колі живлення, струму навантаження і напруги на навантаженні ($Scope$);
- блок для вимірювання миттєвих значень величин, які в полі Measurement блока Universal Bridge 2 arms (Multimeter);
- блоки для вимірювання: а) середнього значення струму в колі живлення ($Display1$); б) середніх значень струму і напруги на навантаженні та середнього і діючого значень струму в силовому колі напівпровідникового модуля ($Display$);
- блоки Mux і $Demux$ для збирання і розділення сигналів.

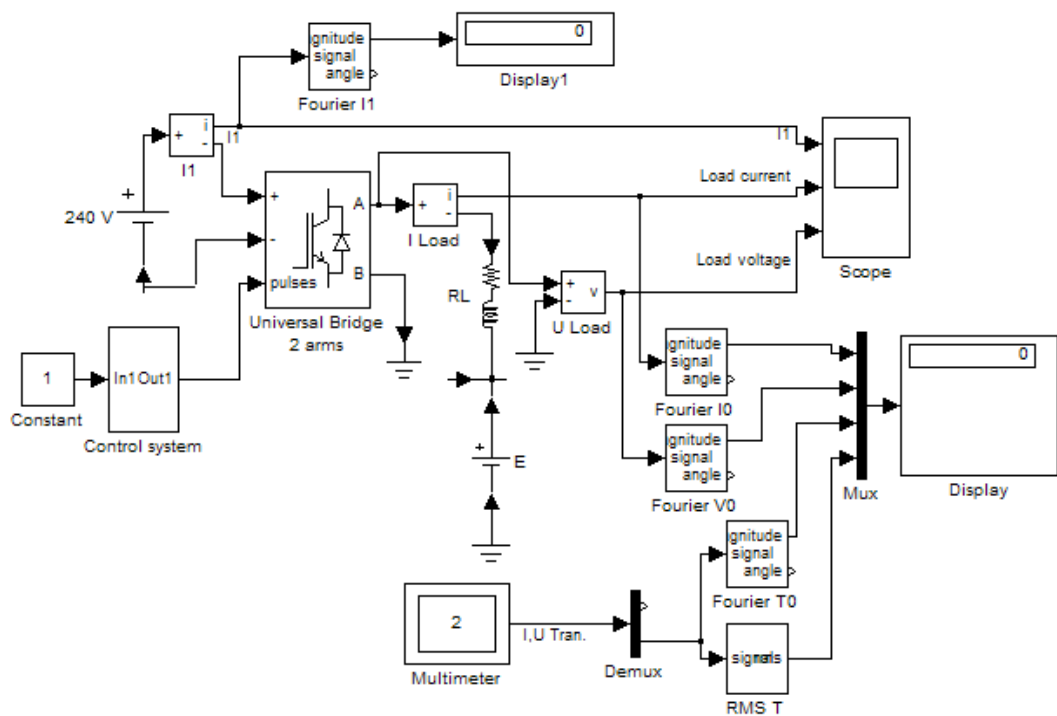


Рис. 2.3. Модель мостового широтно-імпульсного перетворювача

Живлення ШІП здійснюється від джерела постійного струму, в полі налаштування якого задають величину напруги у вольтах (Amplitude, V), (рис. 2.4).

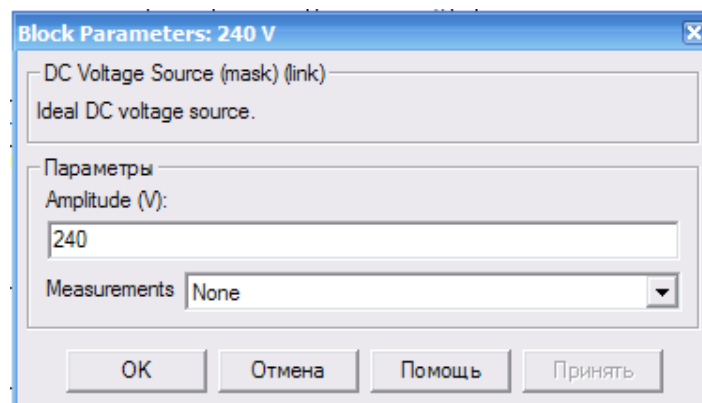


Рис. 2.4. Вікно налаштування параметрів джерела живлення

Модель схеми керування ШПІ (блок Control system, рис. 2.3) відповідно до функціональної схеми (рис. 2.2) на блоках основної бібліотеки Simulink наведена на рис. 2.5.

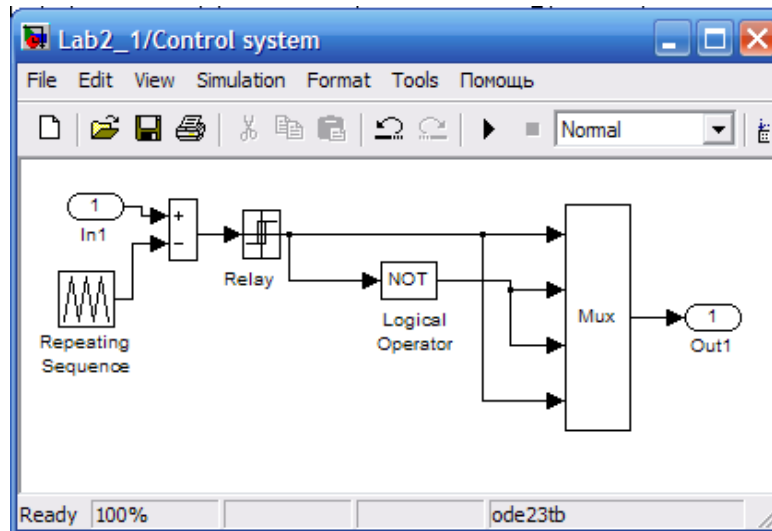


Рис. 2.5. Модель схеми керування ШПІ за симетричним законом

Блок Repeating Sequence реалізує генератор пилкоподібної напруги. Вікно налаштування цього генератора показано на рис. 2.6. В першому полі задаються часові інтервали на періоді, в яких змінюється знак нахилу пилки, в другому полі – напруги, що відповідають цим інтервалам. Із рис. 2.6 видно, що весь період рівний $T_0 = 0,002$ с ($f_0 = 500$ Гц), а амплітуда пилки – 2 В, при цьому пилка симетрична відносно нульового значення. Блок Logical Operator інвертує сигнал, блок Mux перетворює чотири скалярних сигналу в один векторний, який необхідний для керуванням блоком Universal Bridge (порт Out1).

Примітка. В реальних схемах для вимикання транзисторів необхідно формувати на їх базах невелику від’ємну напругу. Для вимикання транзисторів віртуального блока Universal Bridge ця напруга може дорівнювати нулю.

На вхід блока керування (порт In1, рис. 2.5) подається сигнал завдання керування U_{BX} (Constant).

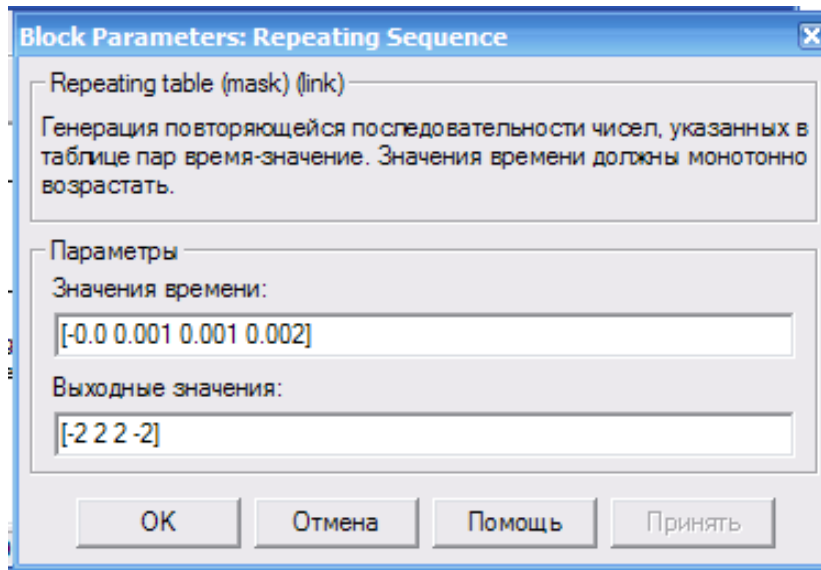


Рис. 2.6. Поле настраивания ГПН

Вікна настраювання блоків Relay і Logical Operator наведені на рис. 2.7 і 2.8.

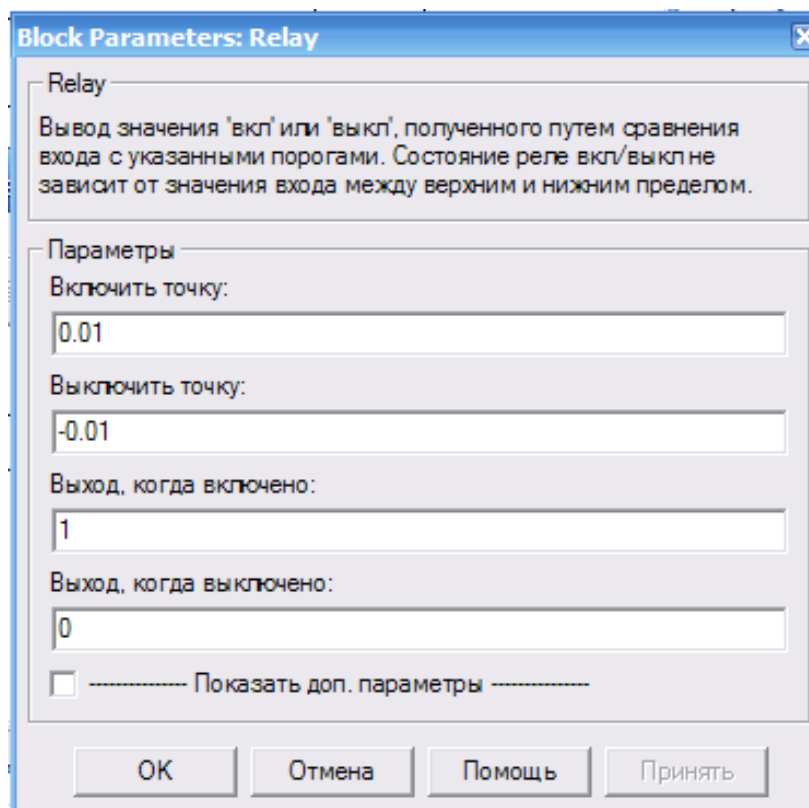


Рис. 2.7. Вікно настраювання блока Relay

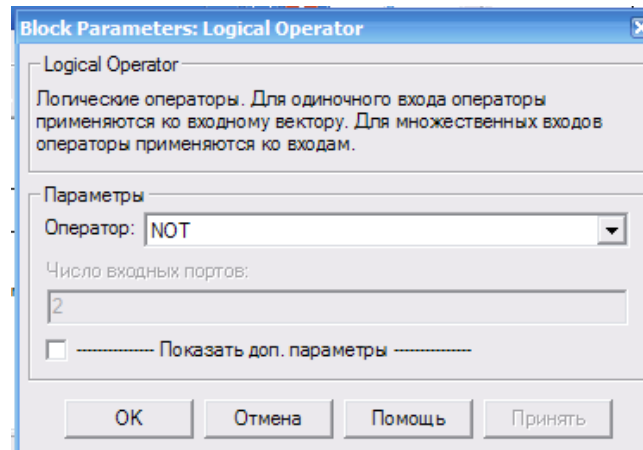


Рис. 2.8. Вікно налаштування параметрів блока Logical Operator

Силовая часть ШПП реализована блоком Universal Bridge, поле настройки параметров якого показано на рис. 2.9.

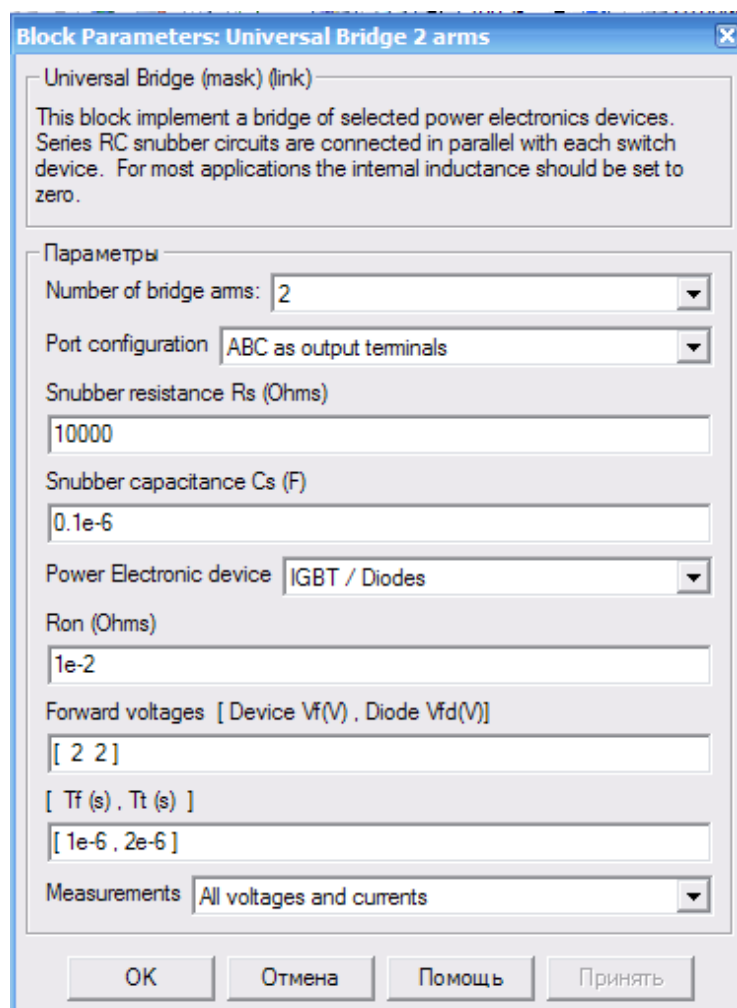


Рис. 2.9. Поле налаштування параметрів транзисторного ШПП

У полі настроювання ШІП задано:

- кількість плечей мосту (2) в полі Number of bridge arms;
- конфігурація вхідних і вихідних портів (Port configuration), у нашому випадку вхідні порти “+” “-“, а вихідні – А і В;
- параметри демпфуючих ланок (Snubber resistance, Snubber capacitance);
- тип напівпровідникових приладів в універсальному мосту (Power Electronic device);
- динамічний опір напівпровідникового модуля у відкритому стані, Ом (Ron, Ohms);
- порогова напруга на транзисторі і діоді модуля у відкритому стані, В (Forward voltage [Device, Vf(V), Diode, Vfd(V)]);
- час спадання і час затягування вимикання, с [Tf(s), Tt(s)].

У полі Measurement вибрані величини, які вимірює блок Multimetr.

Вікно параметрів навантаження наведено на рис. 2.10. Для реалізації активно-індуктивного навантаження в послідовній R, L, C ланці в двох перших полях [Resistance R (Ohms), Inductance L (H)] встановлюється значення активного опору в омах і індуктивності в Генрі, в третьому полі [Capacitance C (F)] – нескінченність (inf).

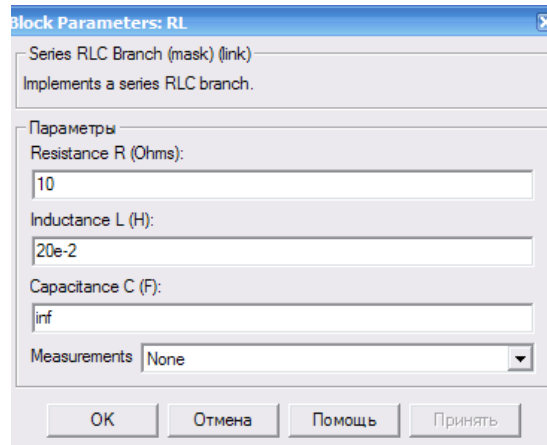


Рис. 2.10. Вікно настроювання параметрів навантаження

У вікнах настроювання параметрів блоків Fourier I1, Fourier I0, Fourier U1, Fourier T0 (рис. 2.3) встановлюється частота напруги ГПН (500 Гц) і номер нульової гармоніки.

Вікно блока для вимірювання діючого струму в напівпровідниковому модулі (RMS T) показано на рис. 2.11. В поле вікна вводиться частота, на якій проводиться вимірювання (в даному випадку – це частота ГПН).

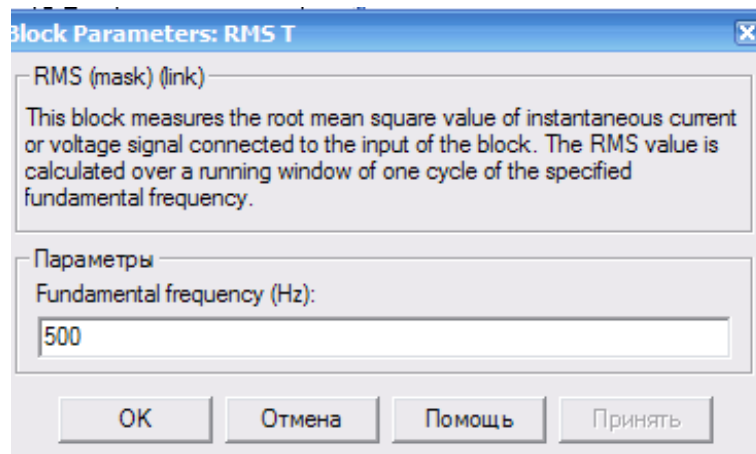


Рис. 2.11. Вікно блока для вимірювання діючого струму

Вікно налаштування параметрів блока Multimeter показано на рис. 2.12. У правому полі встановлені змінні, які необхідно вимірювати. При цьому має значення послідовність, з якою ці змінні розміщені. В такій же послідовності вони представлені на виході блока Demux (рис. 2.3). Ввімкнений прапорець Display signals at simulations stop забезпечує появу графічного вікна (рис. 2.13) після закінчення моделювання.

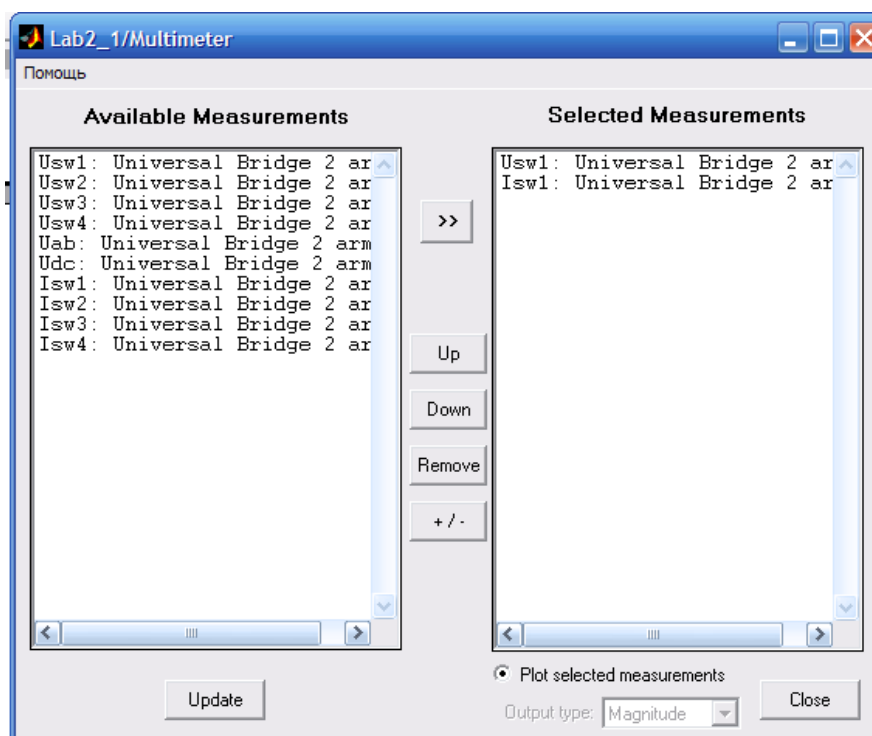


Рис. 2.12. Вікно налаштування блока Multimeter

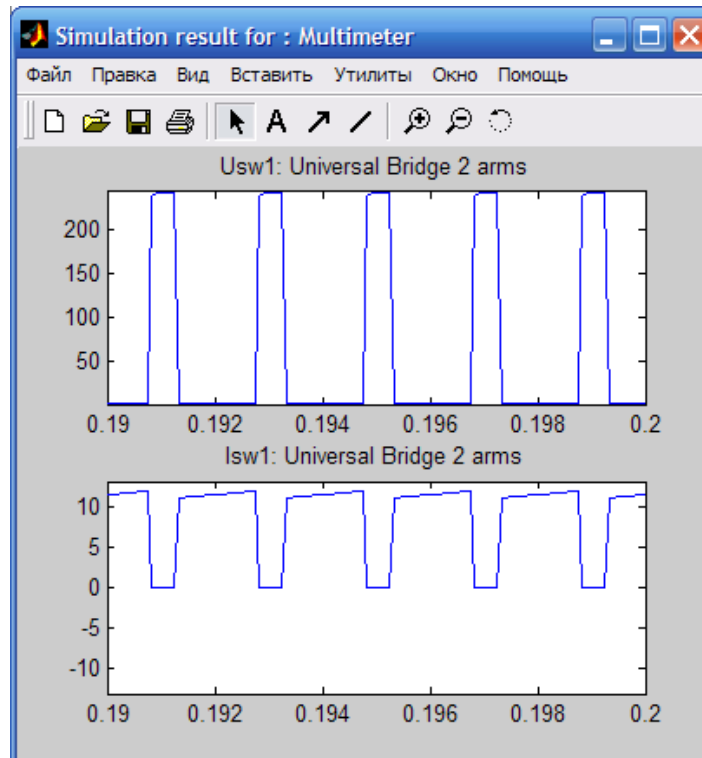


Рис. 2.13. Напруга і струм силового транзистора

Миттєві значення струму живлення, навантаження і напруги на навантаженні спостерігають на екрані осцилографа блока Scope (рис. 2.14).

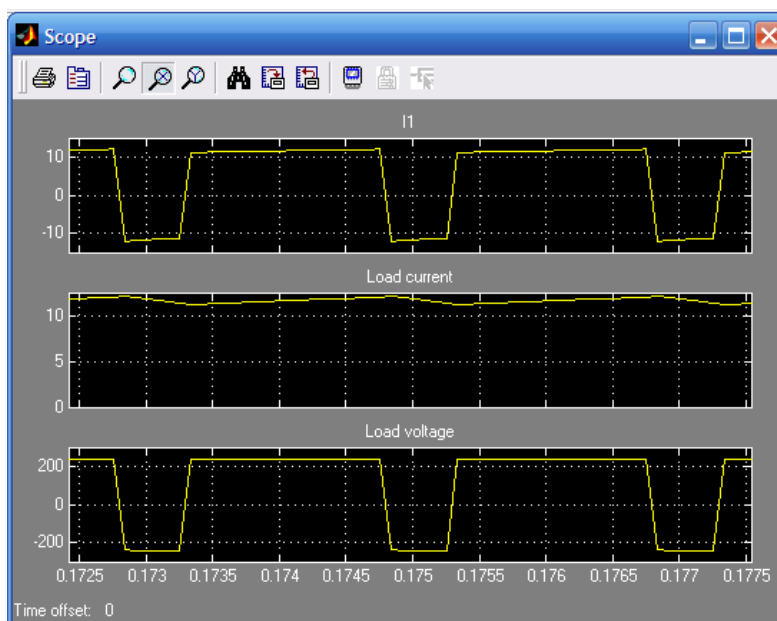


Рис. 2.14. Струм живлення, струм навантаження і напруга на навантаженні ШП

Перевагою симетричного способу керування є простота його реалізації і відсутність зони нечутливості в регулювальних характеристиках. Недолік – наявність двополярної напруги на навантаженні і викликаной нею підвищеної пульсації струму у навантаженні.

Цей недолік усувається при несиметричному законі регулювання.

Функціональна схема при несиметричному керування ШПІ та осцилограми напруг наведені на рис. 2.15. В цьому випадку періодично відкриваються в протифазі транзисторні ключі $VT1$ і $VT2$ (один відкритий, другий закритий і навпаки), транзисторний ключ $VT3$ постійно закритий, а ключ $VT4$ постійно відкритий (рис. 2.1). При другій полярності вхідного сигналу плечі міняються місцями. Транзистори $VT3$ і $VT4$ періодично відкриваються в протифазі, а транзистор $VT1$ – постійно відкритий, а $VT2$ – постійно закритий. При цьому відбувається зміна полярності вихідної напруги.

На виході ШПІ формуються однополярні імпульси довжиною:

$$t_{\text{имп}} = \gamma T, \quad (2.4)$$

де T – період вихідної напруги, с; γ - відносна тривалість імпульсу.

Середнє значення вихідної напруги визначається за виразом

$$U_{\text{н}} = \frac{1}{T} \int_0^{\gamma T} U_{\text{ж}} dt = \gamma U_{\text{ж}}. \quad (2.5)$$

Функціональна схема керування транзисторним ШПІ при несиметричному керуванні (рис. 2.15,а) складається з генератора імпульсів (Γ), генератора пилоподібної напруги ($\GammaПН$), двох суматорів ($\Sigma 1$, $\Sigma 2$), двох схем порівняння ($СП1$, $СП2$), двох розподільників імпульсів ($РІ1$, $РІ2$) і двох підсилювачів ($П1$, $П2$).

На вході суматорів напруга з виходу $\GammaПН$ порівнюється з постійною опорною напругою $U_{\text{оп}}$, величина якої задається рівною максимальній напрузі на виході $\GammaПН$. У результаті з виходів суматорів на входи схем порівняння надходять зміщені на $U_{\text{оп}}$ пилоподібні напруги (рис. 2.15,б). Схема порівняння $СП1$ з розподільником імпульсів $РІ1$ і підсилювачем $П1$ керують перемиканням одного плеча мосту ($VT1$, $VT2$ рис. 2.1), а схема порівняння $СП2$ з $РІ2$ і $П2$ керують перемиканням другого плеча мосту ($VT3$, $VT4$ рис. 2.1).

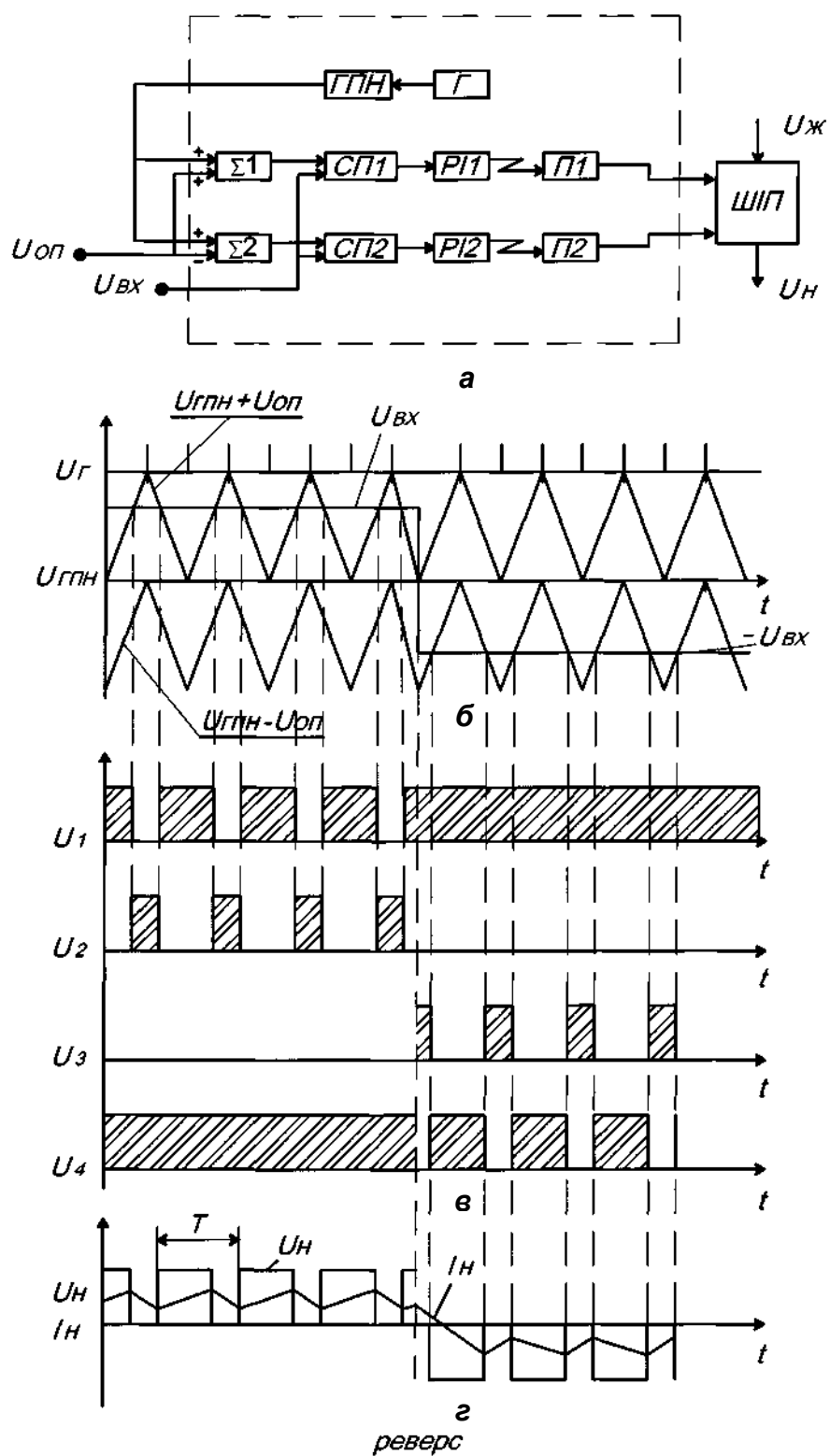


Рис. 2.15. Транзисторний ШПТ з несиметричним керуванням:
а – функціональна схема; **б** – осцилограми напруг керування; **в** – осцилограми напруг керуючих імпульсів на транзисторах; **г** – осцилограми напруги і струму навантаження

Схема віртуальної лабораторної установки для дослідження за п. 4 програми роботи відрізняється від наведеної на рис. 2.3 схемою блока керування (Control systems) та порядком налаштування блока Multimeter.

Віртуальна модель блока керування ШПІ з несиметричним керуванням (рис. 2.16) відрізняється від розглянутої раніше (рис. 2.5) наявністю двох додаткових суматорів і блока опорної напруги зміщення (Constant). Крім того, в схемі добавлено аналогічний додатковий канал розподілення імпульсів.

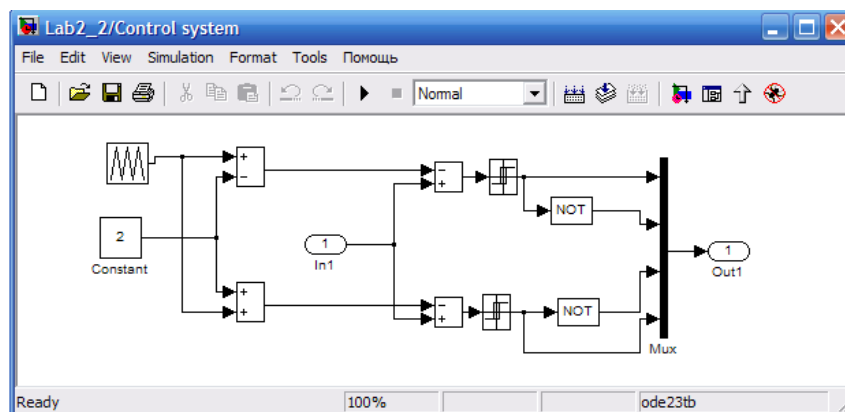


Рис. 2.16. Модель блока керування ШПІ за несиметричним законом

Вікно налаштування блока Multimeter наведено на рис. 2.17. Тут в праве поле перенесені напруги верхніх за схемою (рис. 2.3) силових модулів і струм верхнього за схемою силового модуля, тому що цей модуль найбільше навантажений за струмом.

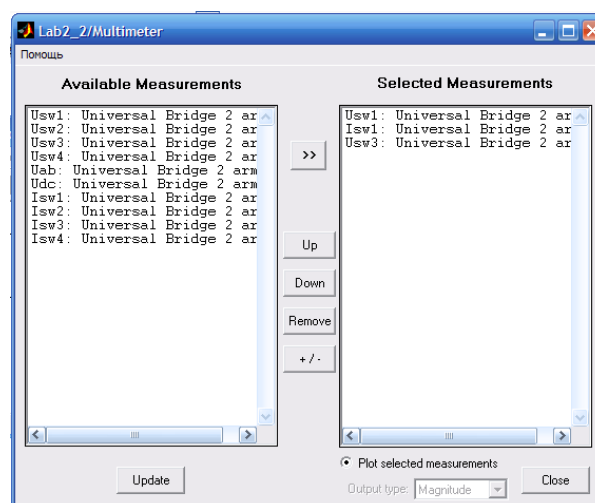


Рис. 2.17. Вікно налаштування параметрів блока Multimeter

Миттєві значення струму живлення, навантаження і напруги на навантаженні спостерігають на екрані осцилографа Scope (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Осцилограми струму живлення, навантаження і напруги на навантаженні

Вказівки щодо виконання роботи

Дослідження регулювальних і енергетичних характеристик мостового широтно-імпульсного перетворювача (ШІП) з симетричним та несиметричним законом керування при роботі на активно-індуктивне навантаження з проти-ЕРС проводиться на віртуальній установці (рис. 2.3) з відповідними блоками керування.

Параметри джерела живлення, навантаження і тиристорного ШІП задаються викладачем. Параметри моделювання задаються на вкладці Simulation/parameters (рис. 2.19).

При зніманні характеристик параметри R , L навантаження залишаються незмінні, змінюється напруга керування (блок Constant, рис. 2.1) від -2 В до 2 В з кроком 0,5 В. Характеристики знімаються при трьох значеннях ЕРС навантаження 0, 100, 200 В.

Моделювання проводиться для кожного значення напруги керування і ЕРС. Результати моделювання і подальші розрахунки заносяться в табл. 2.1.

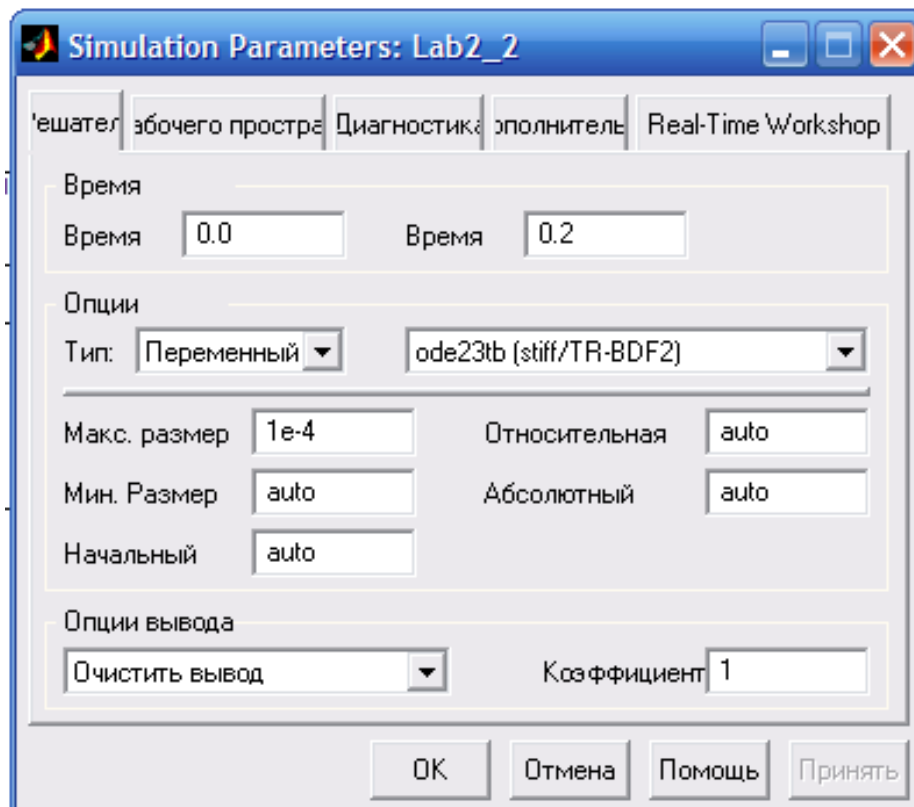


Рис. 2.19. Параметры моделирования

Блоком Display (рис. 2.1) вимірюються величини в такій послідовності: середній струм навантаження I_H ; середня напруга на навантаженні U_H ; середній струм у силовому напівпровідниковому модулі I_T ; діюче значення струму у силовому напівпровідниковому модулі $I_{T.RMS}$.

Середнє значення струму в джерелі живлення I_I вимірюють блоком Display 1 (рис. 2.1).

У графічному вікні блока Multimeter (рис. 2.13) визначаються максимальні напруга $U_{T.MAX}$ і струм $I_{T.MAX}$ силового напівпровідникового модуля.

Результати моделювання характеристик ШП

Вихідні дані		Результати вимірювання							Розрахунок			
U_{BX} , В	E , В	I_H , А	U_H , В	I_L , А	I_T , А	I_{TRMS} , А	$U_{T.MAX}$, В	$I_{T.MAX}$, А	γ в.о.	P_L , Вт	P_T , Вт	P_H , Вт
-2,0	0											
	100											
	200											
-1,5	0											
	100											
	200											
-1,0	0											
	100											
	200											
-0,5	0											
	100											
	200											
0,0	0											
	100											
	200											
0,5	0											
	100											
	200											
1,0	0											
	100											
	200											
1,5	0											
	100											
	200											
2,0	0											
	100											
	200											

Відносну тривалість імпульсу γ напруги на навантаженні визначають за рівнянням:

$$\gamma = \frac{t_i}{T_0}, \quad (2.6)$$

де T_0 – період напруги ГПН, с; t_i – тривалість імпульсу, визначається за допомогою блока Scope (рис. 2.3) по осцилограмі Load Voltage (рис. 2.14 і 2.18) на осі абсцис, тобто при напрузі 0 В, с.

Потужність у колі джерела живлення, Вт, розраховують за формулою:

$$P_1 = U_{\text{ж}} I_1. \quad (2.4)$$

Квазістатичні втрати в силовому напівпровідниковому модулі, Вт, розраховують за рівнянням:

$$P_T = [\gamma V_f + (1 - \gamma) V_{fd}] I_T + R_{on} (I_{T.RMS})^2. \quad (2.5)$$

де V_f , V_{fd} , R_{on} – параметри силового модуля (рис. 2.9).

Потужність у навантаженні, Вт, визначають за рівнянням:

$$P_H = U_H I_H. \quad (2.6)$$

За результатами табл. 2.1 будують:

- регулювальні характеристики ШПП: $U_H = f(\gamma)$;
- енергетичні характеристики ШПП:
 $I_1 = f(I_H)$; $I_{T.RMS} = f(I_H)$; $I_T = f(I_H)$; $I_{T.MAX} = f(I_H)$;
 $P_1 = f(P_H)$; $P_T = f(P_H)$.

Для обох ШПП за одним із варіантів наводять осцилограми значень миттєвих величин I_1 , I_H , U_H та напруги і струму тиристора.

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Програма роботи

1. Ознайомитись з програмним забезпеченням для комп'ютерного моделювання двигунів постійного струму.
2. Побудувати в системі MatLab модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 3.1).
3. На моделі дослідити природну механічну характеристику машини в режимі двигуна і генератора, а також штучні механічні характеристики при різних значеннях напруги на якорі, опорів якірного кола, струмів збудження.
4. Побудувати в системі MatLab віртуальні моделі двигуна постійного струму з незалежним, паралельним та послідовним збудженням (рис. 3.5, 3.7 та 3.9).
5. На віртуальних моделях дослідити характеристики машин згідно з п. 3.
6. За результатами досліджень побудувати механічні $\omega = f(M)$, робочі $\omega = f(P_2)$; $P_1 = f(P_2)$; $I = f(P_2)$; $M = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$ та регулювальну $\omega = f(U)$ характеристики досліджуваної машини.

Загальні методичні вказівки

Електромагнітні та електромеханічні процеси, які відбуваються в двигуні постійного струму незалежного збудження, описуються системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3; \\ u_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + \kappa \Phi \omega; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= m - m_{\text{с}}; \\ \Phi &= \kappa_3 i_3; \\ m &= \kappa \Phi i_{\text{я}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де $u_3, u_{я}$ – поточні значення напруги на обмотці збудження та якорі двигуна, В; $i_3, i_{я}$ – поточні значення струму в обмотці збудження та якірному колі, А; $L_3, L_{я}$ – індуктивність обмотки збудження та обмотки якоря двигуна, Гн; $R_3, R_{я}$ – активний опір обмотки збудження та обмотки якоря двигуна, Ом; κ – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік двигуна, Вб; ω – кутова швидкість обертання якоря двигуна, рад/с; J – зведений до вала електродвигуна момент інерції, кг·м²; m, m_c – поточні значення електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження, Н·м; κ_3 – коефіцієнт пропорційності, що відповідає лінійній частині кривої намагнічування, Вб/А.

Для отримання характеристик електродвигуна за допомогою комп'ютерного моделювання записується система рівнянь у відносних одиницях і операторній формі (за Лапласом):

$$\left. \begin{aligned} u_3^* &= (pT_3 + 1)i_3^*; \\ u_{я}^* &= (pT_{я} + 1)i_{я}^* + i_3^*\omega^*; \\ pT_M\omega^* &= m^* - m_c^*. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де $u_3^*, u_{я}^*$ – поточні значення напруги на обмотці збудження та якорі двигуна у відносних одиницях, в.о.; $i_3, i_{я}$ – поточні значення струму в обмотці збудження та якірному колі, в.о.; $T_3, T_{я}$ – електромагнітні сталі часу обмотки збудження та якірного кола, с; T_M – електромеханічна стала часу, с; p – оператор Лапласа; ω^* – кутова швидкість обертання якоря двигуна, в.о.; m^*, m_c^* – поточні значення електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження, в.о.

Параметри системи (3.2) визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} u_3^* &= \frac{u_3}{U_{3.НОМ}}; \quad u_{я}^* = \frac{u_{я}}{U_{я.НОМ}}; \quad i_3^* = \frac{i_3 R_3}{U_{3.НОМ}} = \frac{i_3}{I_{3.НОМ}}; \quad i_{я}^* = \frac{i_{я} R_{я}}{U_{я.НОМ}} = \frac{i_{я}}{I_{к.з.д}}; \\ I_{к.з.д} &= \frac{U_{я.НОМ}}{R_{я}}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{0.ПР}}; \quad T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}; \quad T_3 = \frac{L_3}{R_3}; \\ m_c^* &= \frac{m_c}{M_{к.з.д}}; \quad m^* = \frac{m}{M_{к.з.д}}; \quad M_{к.з.д} = \kappa \Phi_{НОМ} I_{к.з.д}; \\ T_M &= \frac{J \omega_{0.ПР}}{M_{к.з.д}} \text{ або: } T_M = \frac{J R_{я} \omega_{НОМ}^2}{(U_{я.НОМ} - I_{я.НОМ} R_{я})^2}; \quad T_M = \frac{J R_{я} \omega_{НОМ}^2 I_{я.НОМ}^2}{P_{д.НОМ}^2}; \quad T_M = \frac{J}{\beta}, \end{aligned}$$

де $\omega_{0.ПР}$ – швидкість обертання ідеально холостого ходу на природній характеристиці, рад/с; $\omega_{НОМ}$ – номінальна швидкість обертання якоря

двигуна, рад/с; $I_{к.з.д}$, $M_{к.з.д}$ – відповідно струм (А) і електромагнітний момент (Н·м) короткого замикання двигуна; P_H – номінальна потужність двигуна, Вт; β – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м/(рад/с).

Параметри двигуна визначають за каталоговими даними або для двигунів основного виконання розраховують за наведеними нижче рівняннями.

Індуктивність обмотки якоря:

$$L_{я} \approx \frac{30U_{я.ном}C_x}{\pi p n_H I_{я.ном}}, \quad (3.3)$$

де p_H – кількість пар полюсів; C_x – емпіричний коефіцієнт (0,1 – для машин з компенсаційною обмоткою, 0,4 – для машин без компенсаційної обмотки); $n_{ном}$ – номінальна частота обертання якоря двигуна, об/хв.

Індуктивність обмотки збудження:

$$L_z \approx (2 \div 5) \frac{L_{я} R_z}{R_{я}}. \quad (3.4)$$

Момент інерції якоря двигуна:

$$J_{я} \approx \frac{(5 \div 10) L_{я} P_{ном}^2}{R^2 \omega_{ном}^2 I_{я.ном}^2}, \quad (3.5)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, Вт.

Модель двигуна постійного струму незалежного збудження наведена на рис. 3.1.

Модель має два входи керування Step1 (задається напруга на обмотці збудження u_z^*) і Step2 (задається напруга на якорі двигуна $u_{я}^*$) та один вхід збурення Step3 (задається момент m_c^* або струм i_c^* навантаження). Блоки Sum і Transfer Fcn 2 моделюють ланку якоря двигуна (електромагнітна стала часу якорного кола для даної моделі прийнята $T_{я}=0.02$ с). Блоки Sum1, Integrator і підсилювач Gain2 з коефіцієнтом $K_2=1/T_M$ реалізують рівняння руху електропривода. Блок Transfer Fcn моделює ланку обмотки збудження (електромагнітна стала часу обмотки збудження прийнята $T_z=0.05$ с). Вхідні параметри моделі задаються у відносних одиницях. Для переведення їх з відносних величин в іменовані встановлені блоки у вигляді підсилювачів: по контуру навантаження (струм якоря двигуна) блоки-

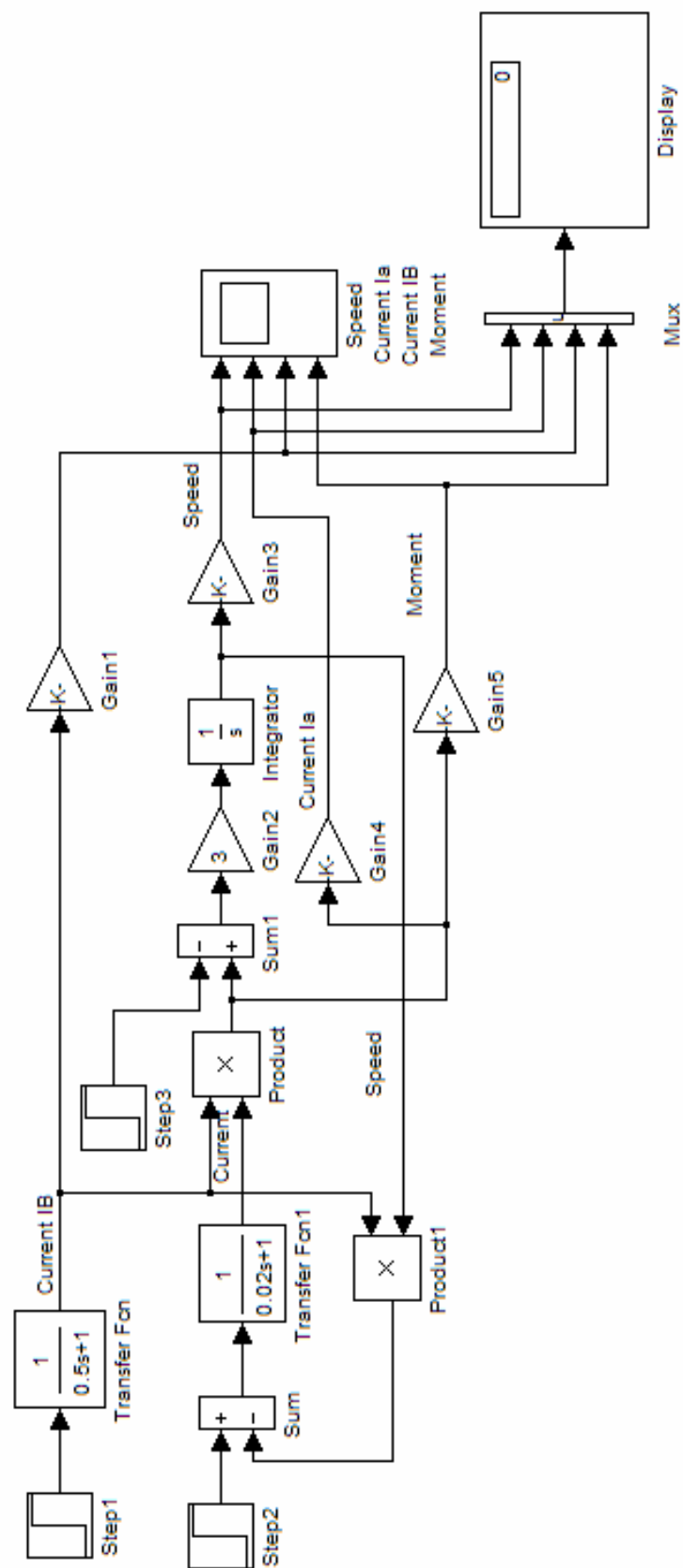


Рис. 3.1. Модель двигуна постійного струму незалежного збудження (позначення на схемі I_B , I_a , s відповідають позначенням у тексті I_3 , I_A , p)

підсилювачі Gain4 з коефіцієнтом підсилення $K_4=I_{K.3,Д}$ та Gain5 з коефіцієнтом підсилення $K_5=M_{K.3,Д}$, по контуру швидкості обертання блок-підсилювач Gain3 з коефіцієнтом підсилення $K_3=\omega_{0,ПР.}$, по контуру обмотки збудження блок-підсилювач Gain1 з коефіцієнтом підсилення $K_I=I_{3,НОМ.}$

Блок Display призначений для вимірювання середнього значення швидкості, струму та електромагнітного моменту двигуна та середнього значення струму збудження. Осцилограф дає можливість спостерігати миттєві значення вказаних величин.

У полі налаштування блока передаточної функції Transfer Fcn (рис. 3.2) задаються коефіцієнти чисельника і знаменника, які визначаються за параметрами двигуна. Порядок степеня в чисельнику не повинен перевищувати порядок степеня в знаменнику.

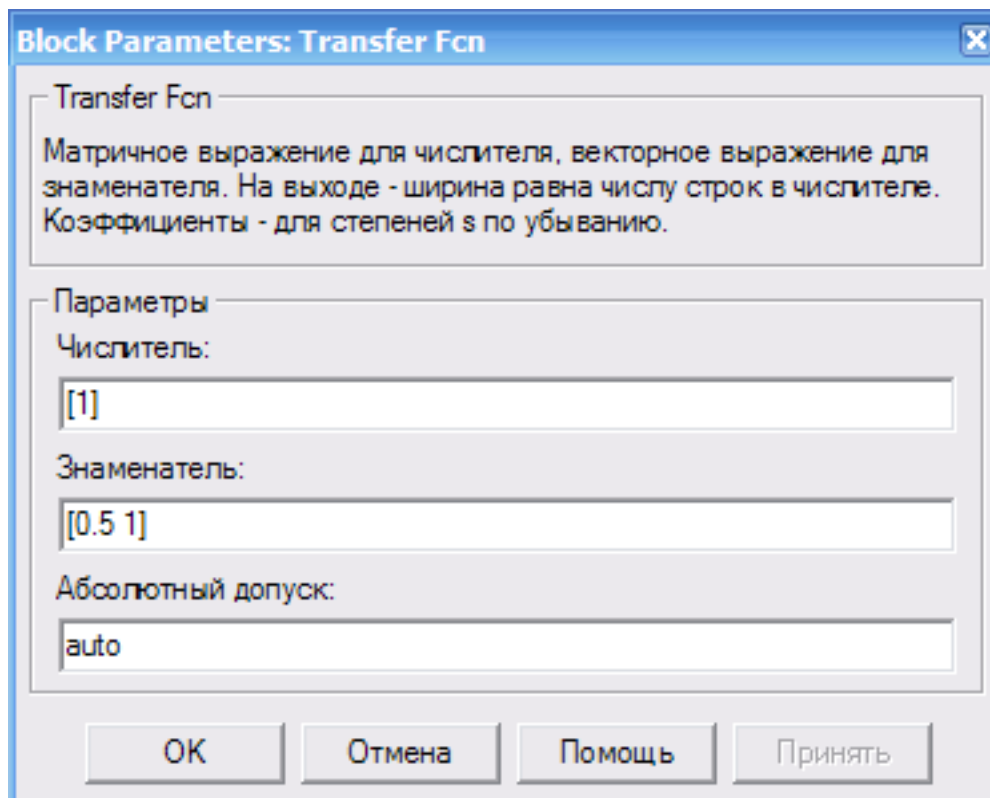


Рис. 3.2. Вікно налаштування блоку Transfer Fcn

Вікно налаштування блоків Step наведено на рис. 3.3. У ньому задаються: Step time – час подачі сигналу; Initial value – початкове значення сигналу; Final value – кінцеве значення сигналу.

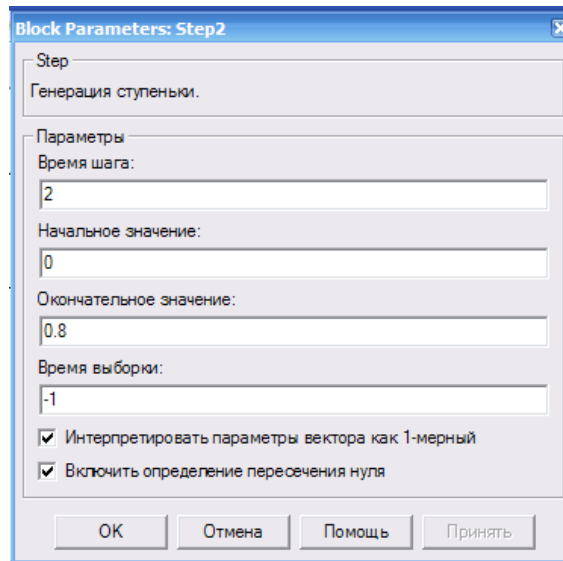


Рис. 3.3. Вікно налаштування блоку Step

У полі налаштування блоку Gain (рис. 3.4) задається тільки коефіцієнт підсилення.

Рис. 3.4. Вікно налаштування блоку Gain

У полі налаштування інтегратора (рис. 3.5) задають початковий стан відносної швидкості якоря двигуна.

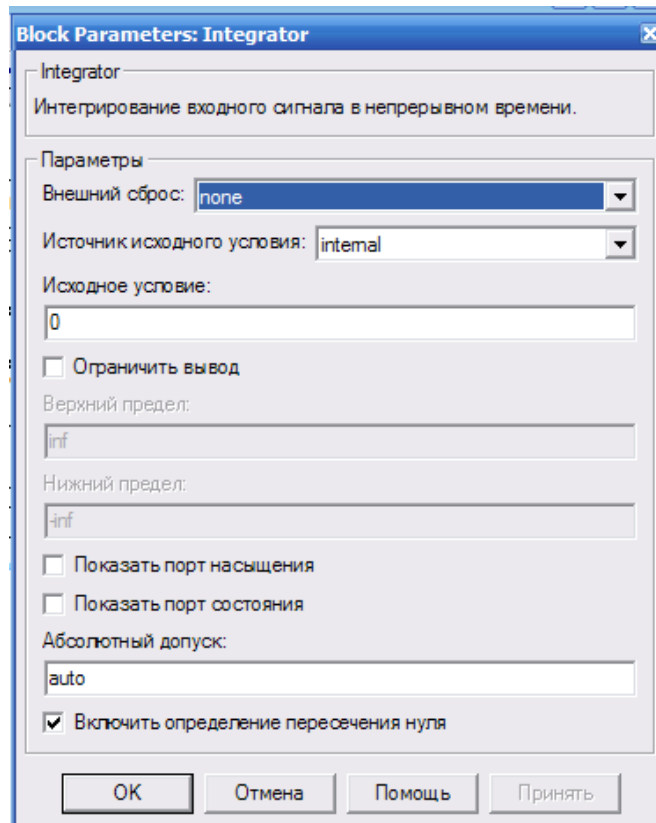


Рис. 3.5. Вікно налаштування блока Integrator

Віртуальна модель двигуна постійного струму незалежного збудження наведена на рис. 3.6.

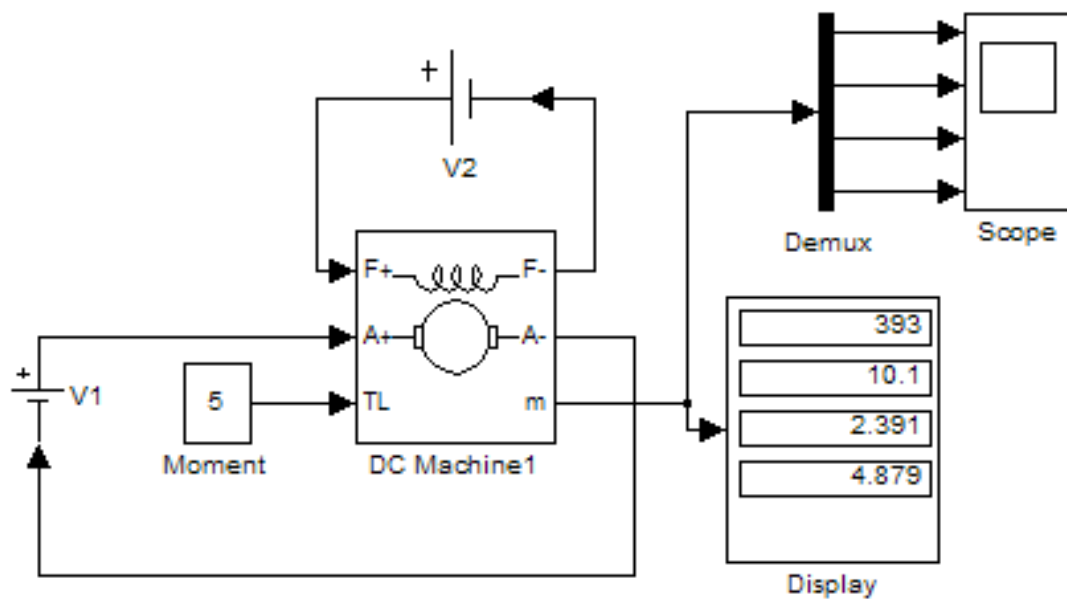


Рис. 3.6. Віртуальна модель двигуна постійного струму незалежного збудження

Модель має джерела постійного струму (V1 – для живлення якоря, V2 – для живлення обмотки збудження із бібліотеки Power System Blockset/Electrical Sources), блок Moment для задання моменту навантаження (блок Constant із бібліотеки Simulink/Sources), двигун постійного струму (блок DC Machine 1 із бібліотеки Power System Blockset/Machines), блок для вимірювання змінних величин двигуна Display та осцилограф Scope для візуального спостереження перехідних процесів.

Ланки якоря та обмотки збудження видно із графічного зображення блоку двигуна (рис. 3.7). На вхід TL подається момент навантаження m_c , вихід m призначений для вимірювання і спостереження змінних величин двигуна в такій послідовності: кутова швидкість (рад/с), струм якоря (А), струм збудження (А), електромагнітний момент (Н·м).

У полях налаштування двигуна (рис. 3.6) задаються:

- параметри обмотки якоря – R_a (Ohms), L_a (H);
- параметри обмотки збудження – R_f (Ohms), L_f (H);
- взаємна індукція між обмотками збудження та якоря – L_{af} (H);
- зведений момент інерції привода – $J(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$;
- коефіцієнт в'язкого тертя – B_m (N·m·с);
- коефіцієнт сухого тертя – T_f (N·м);
- початкова швидкість – ω (rad/s).

Параметри досліджуваного на моделі двигуна беруться з каталогу на машину та розраховують за рівняннями.

Номінальний струм збудження:

$$I_{з.НОМ} = \frac{U_{з.НОМ}}{R_z}. \quad (3.6)$$

Номінальний електромагнітний момент:

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{30P_{НОМ}}{\pi \cdot n_{НОМ}}. \quad (3.7)$$

Номінальний струм якоря двигуна:

а) незалежного збудження

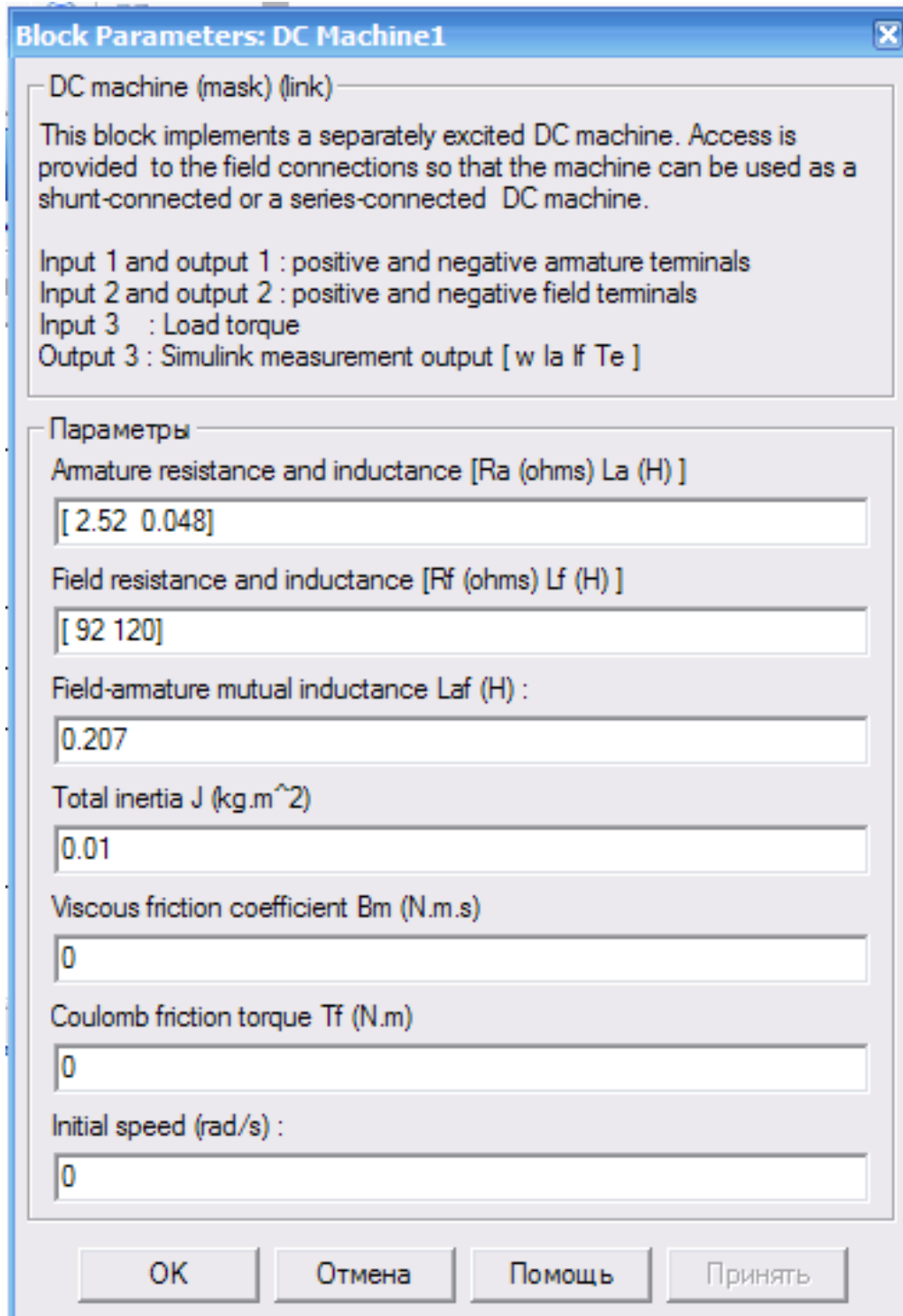
$$I_{я.НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{U_{я.НОМ} \eta_{НОМ}}; \quad (3.8)$$

б) паралельного збудження

$$I_{я.НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{U_{я.НОМ} \eta_{НОМ}} - I_{з.НОМ}. \quad (3.9)$$

Взаємна індукція між обмоткою збудження та обмоткою якоря:

$$L_{af} = \frac{M_{НОМ}}{I_{Я.НОМ} I_{З.НОМ}} . \quad (3.10)$$



Block Parameters: DC Machine1

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.

Input 1 and output 1 : positive and negative amature terminals
 Input 2 and output 2 : positive and negative field terminals
 Input 3 : Load torque
 Output 3 : Simulink measurement output [w la lf Te]

Параметры

Amature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]
 [2.52 0.048]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]
 [92 120]

Field-amature mutual inductance Laf (H) :
 0.207

Total inertia J (kg.m^2)
 0.01

Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)
 0

Coulomb friction torque Tf (N.m)
 0

Initial speed (rad/s) :
 0

OK Отмена Помощь Принять

Рис. 3.7. Вікно настроювання параметрів двигуна постійного струму

Індуктивність обмоток якоря і збудження та момент інерції двигуна загального виконання визначають за виразами (3.3) і (3.4).

Коефіцієнт сухого тертя T_f та коефіцієнт в'язкого тертя B_m визначають, виходячи із наступного. Загальні механічні втрати для двигуна загального виконання будуть

$$\Delta P_{MEX} = \frac{0,5 \div 2}{100} P_{НОМ} = T_f \omega_{НОМ} + B_m \omega_{НОМ}^2. \quad (3.11)$$

Втрати в двигуні на тертя і вентиляційні втрати приблизно рівні. Тоді можна записати:

$$T_f = \frac{\Delta P_{MEX}}{2\omega_{НОМ}}; \quad B_m = \frac{\Delta P_{MEX}}{2\omega_{НОМ}^2}. \quad (3.12)$$

За аналогією з віртуальною моделлю двигуна (рис. 3.6) на рис. 3.8 наведена віртуальна модель двигуна постійного струму паралельного збудження.

Модель має одне джерело живлення, до якого паралельно підключені обмотка якоря та обмотка збудження. Блок Bus Bar об'єднує дві входні лінії зв'язку в одну, у вікні налаштування цього блока задають кількість входів і виходів (рис. 3.9).

При дослідженні параметри двигуна задаються аналогічно попередній моделі.

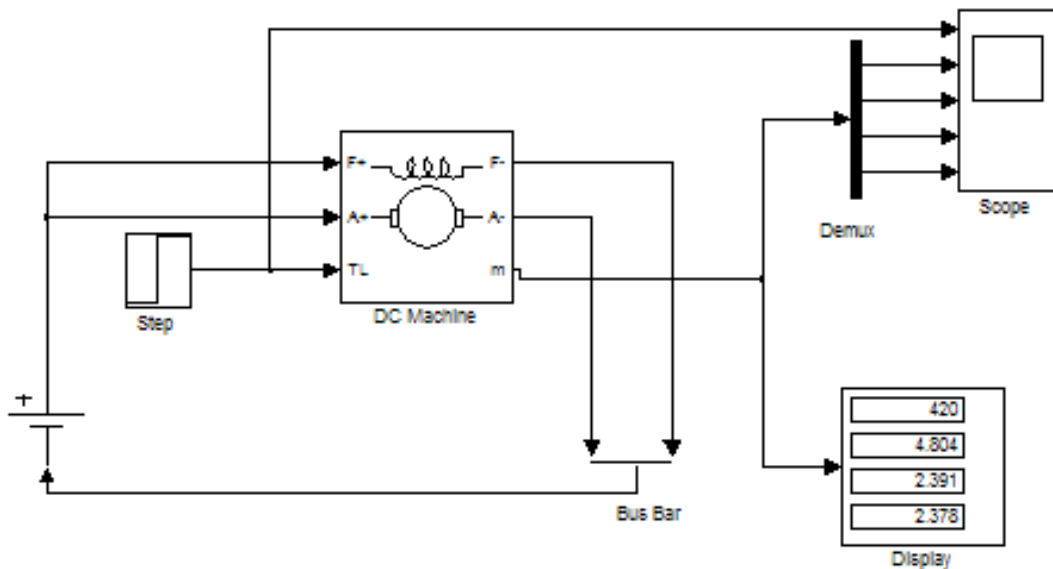


Рис. 3.8. Віртуальна модель двигуна постійного струму паралельного збудження

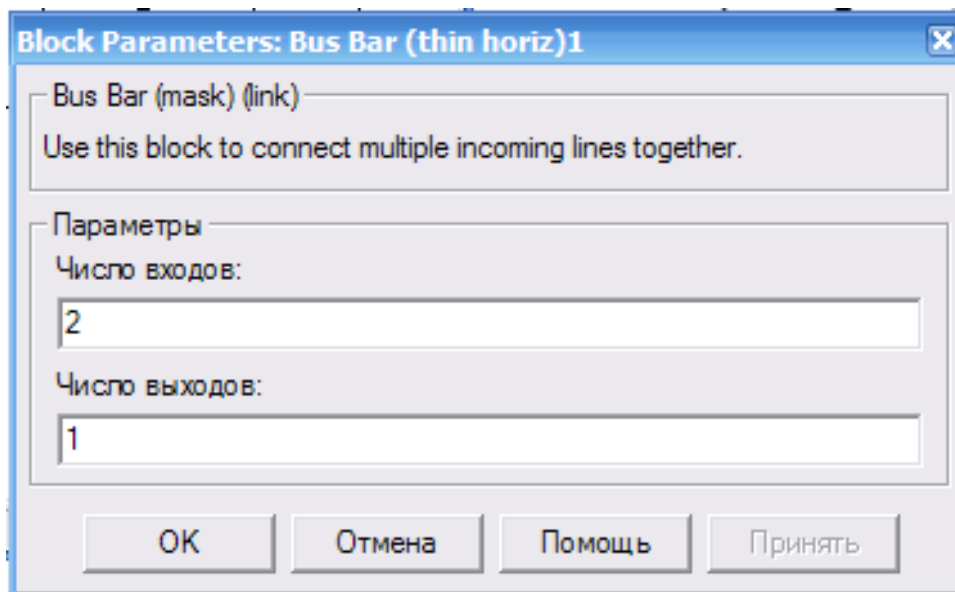


Рис. 3.9. Вікно налаштування блоку Bus Bar

Дослідження характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження приводять на віртуальній моделі установки (рис. 3.10). Модель включає джерело постійного струму V , блок Step для задання моменту навантаження, двигун постійного струму DC Machine 1, блок для вимірювання змінних параметрів двигуна Display, блок Scope для візуального спостереження за параметрами двигуна.

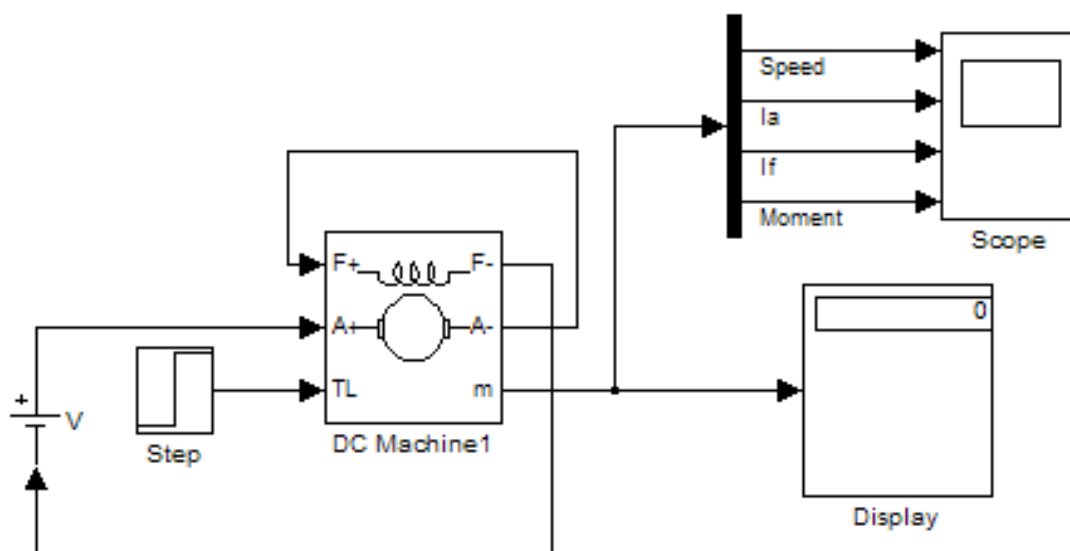


Рис. 3.10. Віртуальна модель двигуна постійного струму послідовного збудження

Вікна налаштувань блоків віртуальної моделі наведені на рис. 3.11–3.14.

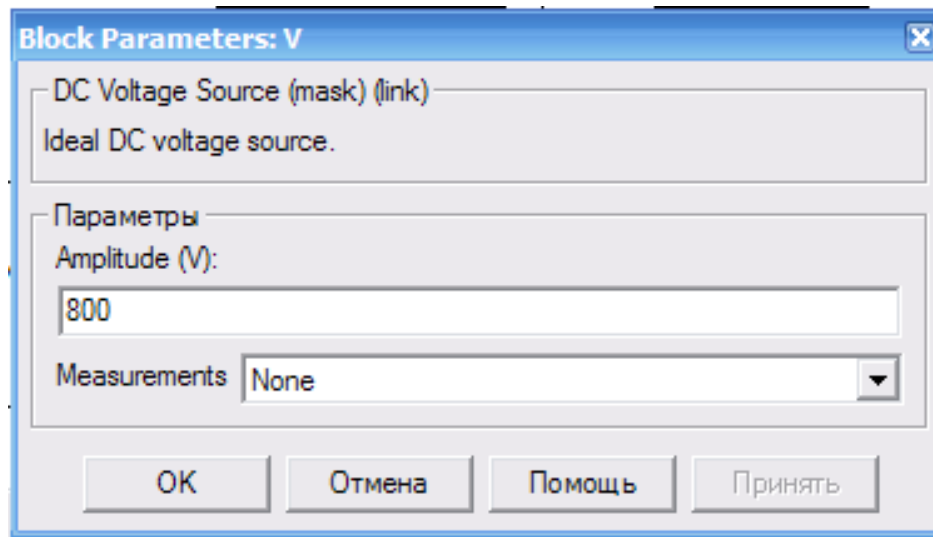


Рис. 3.11. Вікно налаштування джерела постійного струму

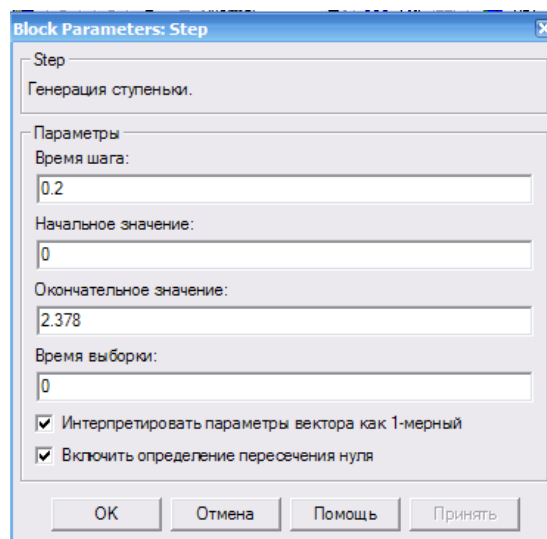


Рис. 3.12. Вікно налаштування блока Step

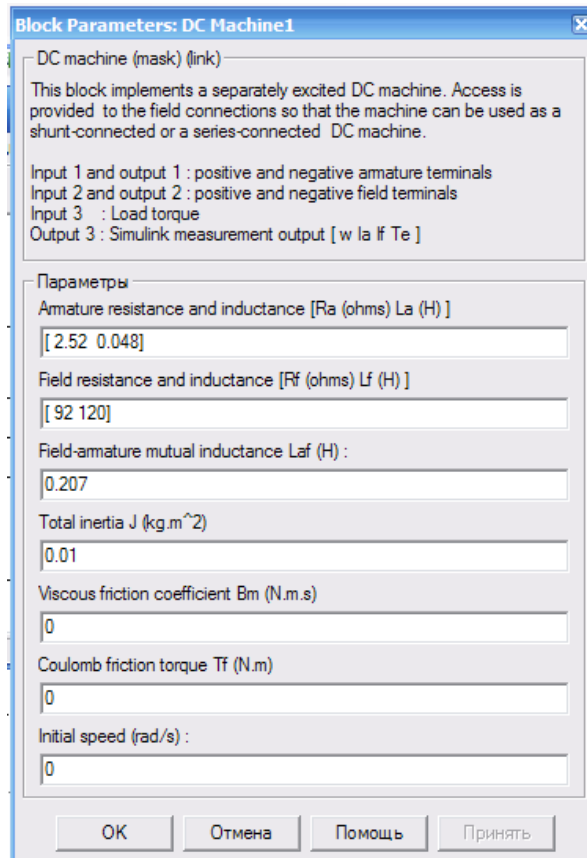


Рис. 3.13. Вікно налаштування блоку DC Machine 1

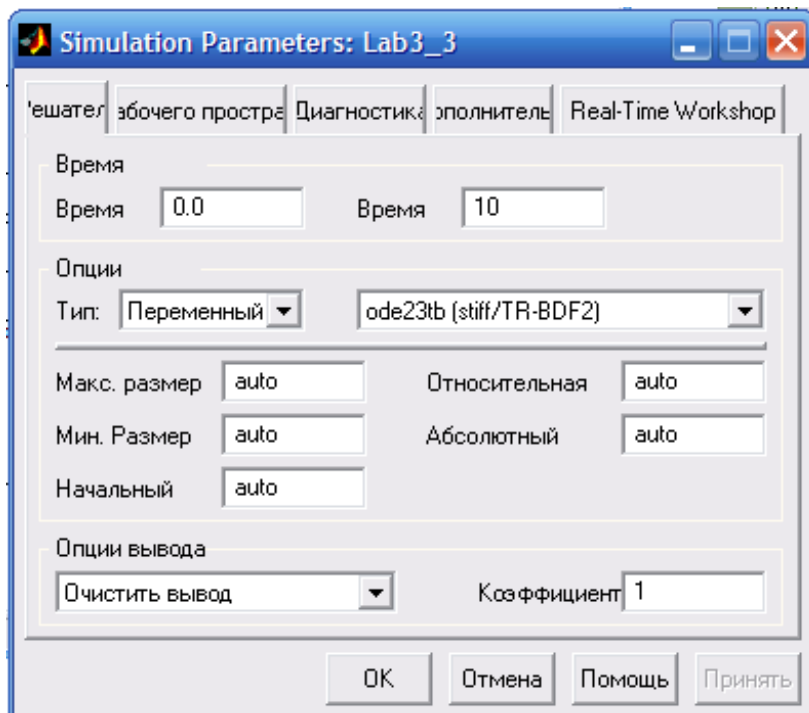


Рис. 3.14. Вікно налаштування параметрів моделювання

Вказівки щодо виконання роботи

Створити модель для заданого викладачем електродвигуна. Розрахувати параметри двигуна і записати їх в поля вікна настроювання машини.

Задати параметри моделювання (рис. 3.14).

При визначенні механічних і розрахунку робочих характеристик двигуна з незалежним і паралельним збудженням в режимі двигуна і генератора у вікні настроювання блока задання моменту послідовно задається значення моменту від $-1,2$ до $1,2M_H$ з кроком $0,2M_H$. Для двигуна з послідовним збудженням значення моменту задається від $0,2$ до $1,2M_H$. При кожному значенні моменту здійснюють моделювання і заповнюють табл. 3.1.

Розрахункові дані табл. 3.1 визначаються за виразами:

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} + U_{\text{з}} I_{\text{з}} \quad \text{— для двигуна з незалежним збудженням;} \quad (3.13)$$

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} \quad \text{— для двигуна з послідовним збудженням;} \quad (3.14)$$

$$P_2 = M \omega; \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{— режим двигуна (навантаження позитивне);} \quad (3.13)$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \quad \text{— режим генератора (навантаження від'ємне).} \quad (3.14)$$

Дослідження характеристик при різних напругах живлення в колі якоря проводиться для двох значень напруги на якорі $0,6U_{\text{НОМ}}$ і $0,8U_{\text{НОМ}}$. При цьому момент навантаження змінюють аналогічно так, як у попередньому досліді. Результати моделювання заносять у табл. 3.1.

Дослідження характеристик при різних опорах в якірному колі проводять для двох значень опору якоря $2R_{\text{я}}$ і $4R_{\text{я}}$. Зміну опору якоря у віртуальних моделях здійснюють у полі вікна настроювання машини. Для моделі за рис. 3.1 проводиться перерахунок електромеханічної сталої якірного кола $T_{\text{я}}$ і нове значення заноситься у вікно настроювання блока Transfer Fcn 1. Момент навантаження змінюють аналогічно попереднім дослідом. Результати моделювання заносять в табл. 3.1.

Механічні та робочі характеристики машини
($U_{Я} = U_{Я.НОМ}$)

Момент навантаження M_C		Вимірювання			Розрахунок			Режим роботи
в.о.	Н·м	ω , рад/с	$I_{Я}$, А	I_3 , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , в.о.	
-1,2								Генератор
-1,0								
-0,8								
-0,6								
-0,4								
-0,2								
0,0								Двигун
0,2								
0,4								
0,6								
0,8								
1,0								
1,2								

Дослідження характеристик при різних значеннях магнітного потоку проводять для двох значень $0,6\Phi_{НОМ}$ і $0,8\Phi_{НОМ}$. Для цього в полі вікна налаштування машини необхідно встановити значення Laf спочатку 0,6, а потім 0,8 початкової величини. Крім того, для двигунів незалежного збудження встановити значення напруги джерела живлення обмотки збудження, відповідно 0,6, а потім 0,8 початкової величини. Момент навантаження змінюють аналогічно попереднім дослідом. Результати моделювання заносяться в табл. 3.1.

Дослідження регульовальних характеристик проводиться з постійним моментом навантаження $M_C = M_{НОМ}$ і при зміні напруги на якорі від $0,4$ до $1,2U_{Я.НОМ}$ з кроком $0,2U_{Я.НОМ}$. Для кожного значення напруги проводять моделювання і результати заносять в табл. 3.2.

3.2. Регулювальна характеристика двигуна

$U_{я}, В$		$\omega, \text{рад/с}$
в.о.	В	
0,4		
0,6		
0,8		
1,0		
1,2		

За результатами досліджень побудувати залежності:

- механічні характеристики $\omega = f(M)$;
- робочі характеристики $\omega = f(P_2)$; $I = f(P_2)$; $M = f(P_2)$;
 $P_1 = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$;
- регулювальну характеристику $\omega = f(U_{я})$.

Лабораторна робота №4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Програма роботи

1. Створити в MatLab вказану викладачем модель регульованого електропривода.
2. За осцилограмами провести аналіз електромеханічних $\omega = f(I)$ і механічних $\omega = f(M)$ характеристик регульованого електропривода та перехідних процесів при запуску двигуна $i = f(t)$; $m = f(t)$ та $\omega = f(t)$ без навантаження і з навантаженням $M_c = M_{c.n}$.
3. На віртуальних моделях дослідити механічні і робочі характеристики.
4. Визначити показники регулювання досліджуваної моделі регульованого електропривода:
 - діапазон регулювання;
 - стабільність швидкості.
5. За результатами досліджень навести осцилограми за п.2; побудувати механічні характеристики $\omega = f(M)$, робочі характеристики $\omega = f(P_2)$, $I = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ та регулювальну характеристику $\omega = f(U_{\Sigma})$.

Загальні методичні вказівки

Для керування двигуном постійного струму найбільш розповсюдженими є керований випрямляч, який перетворює напругу змінного струму у регульовану напругу постійного струму, та широтно-імпульсний перетворювач, який постійну нерегульовану напругу перетворює в постійну регульовану.

Система – тиристорний перетворювач напруги-двигун (ТПН-Д).

Динаміка системи ТПН-Д, де проміжною координатою є струм, описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} e_{\text{ТП}}(1 + T_{\text{ТП}}p) &= K_{\text{ТП}}u_K; \\ R_{\Sigma}(1 + T_{\Sigma}p)i_{\Sigma} &= e_{\text{ТП}} - k\Phi_H\omega; \\ T_M\beta_{\text{ТП-Д}}\omega p &= (i_{\Sigma} - i_c)k\Phi_H. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Для механічної характеристики система рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \omega_0(1+T_{ТП}p) &= K'_{ТП}u_K; \\ m(1+T_{Я}p) &= \beta_{ТП-Д}(\omega_0 - \omega); \\ T_M\beta_{ТП-Д}\omega p &= m - m_C, \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де $e_{ТП}$ – електрорушійна сила ТПН, В; $T_{ТП}$ – стала часу ТПН (як правило невелика і приймається $T_{ТП}=0,01$ с); p – оператор Лапласа; $K_{ТП}$ – коефіцієнт підсилення ТПН за напругою; u_K – поточне значення напруги керування, В; $R_{\Sigma} = R_{Я.Д} + R_{ТР} + R_{ДР} + R_K + R_B$ – повний опір якірного кола системи ТПН-Д; $R_{Я.Д}$ – опір якірного кола двигуна, Ом; $R_{ТР}$ – опір вторинної обмотки трансформатора, Ом; $R_{ДР}$ – опір згладжувального дроселя, Ом; R_K – комутаційний опір, Ом; R_B – опір вентилів, що обтікаються струмом, Ом; $i_{Я}$ – поточне значення струму якірного кола, А; κ – конструктивний коефіцієнт двигуна, В/(Вб·рад/с); Φ_H – номінальний магнітний потік двигуна, Вб; ω , ω_0 , ω_H – кутова швидкість обертання двигуна, відповідно поточна, ідеального холостого ходу і номінальна, рад/с; $\beta_{ТП-Д}$ – жорсткість механічної характеристики в системі ТПН-Д, Н·м/(рад/с); $T_{Я} = L_{\Sigma}/R_{\Sigma}$ – стала часу кола якоря, с; $L_{\Sigma} = L_{Я.Д} + L_{ТР} + L_{ДР}$ – сумарна індуктивність якірного кола системи ТПН-Д, Гн; $L_{Я.Д}$, $L_{ТР}$, $L_{ДР}$ – відповідно індуктивності двигуна, трансформатора і згладжувального дроселя, Гн; T_M – електромеханічна стала часу привода, с; m , m_C – відповідно поточні значення електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження, Н·м; i_C – поточне значення струму навантаження, А; $K'_{ТП} = K_{ТП} / \kappa \Phi_H$ – коефіцієнт підсилення за напругою для механічної характеристики, (рад/с)/В.

Коефіцієнт підсилення ТПН визначається за формулою:

$$K_{ТП} = \frac{u_{ТПМАХ}}{u_{КМАХ}}, \quad (4.3)$$

де $u_{ТПМАХ}$ – максимальна напруга на виході ТРН ($u_{ТПМАХ} = 220$ В); $u_{КМАХ}$ – максимальна напруга керування ($u_{КМАХ} = 10$ В).

Систему рівнянь (4.1) і (4.2) для динамічних електромеханічної і механічної характеристик отримані з урахуванням того, що

$$e_d = \kappa \Phi_H \omega, \quad \omega_0 = e_{TP} / \kappa \Phi_H, \quad \beta_{TP-D} = (\kappa \Phi_H)^2 / R_{\Sigma},$$

$$m = \kappa \Phi_H i_A, \quad \kappa \Phi_H = \frac{U_{д.н} - I_{я.н} R_{\Sigma}}{\omega_H}, \quad \omega = \frac{\pi n}{30},$$

де $U_{д.н}$ – номінальна напруга двигуна, В; $I_{я.н}$ – номінальний струм двигуна, А; n – частота обертання двигуна, об/хв.

Електромеханічну сталу часу T_M можна визначити за виразами:

$$T_M = \frac{J R_{\Sigma} \omega_H^2}{(U_{д.н} - I_{я.н} R_{\Sigma})^2}; \quad T_M = \frac{J R_{\Sigma} \omega_H^2 I_{я.н}^2}{P_H^2} \quad \text{або} \quad T_M = \frac{J}{\beta_{TP-D}}, \quad (4.4)$$

де J – зведений момент інерції системи електродвигун – робоча машина, кг·м²; P_H – номінальна потужність двигуна, Вт.

Індуктивність якоря визначають за наближеною формулою:

$$L_{\Sigma} \approx \frac{30 U_H C_x}{\pi p n_H I_{я.н}}, \quad (4.5)$$

де U_H – номінальна напруга машини, В; p – кількість пар полюсів; C_x – емпіричний коефіцієнт (0,1 – для машин з компенсаційною обмоткою, 0,4 – для машин без компенсаційної обмотки).

Рівняння (4.1) і (4.2) описують систему керування ТПН-Д без зворотних зв'язків.

Робота системи ТПН-Д при додатному зворотному зв'язку за струмом описується такими рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} e_{TP} (1 + T_{TP} p) &= K_{TP} (u_k + K_{п.с} i_A); \\ R_{\Sigma} (1 + T_{\Sigma} p) i_A &= e_{TP} - \kappa \Phi_H \omega; \\ T_M \beta_{TP-D} \omega p &= (i_A - i_C) \kappa \Phi_H, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

де $K_{п.с}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом, Ом.

$$K_{п.с} = \frac{R_{\Sigma}}{K_{TP}}. \quad (4.7)$$

При статичній рівновазі системи ($p=0$) рівняння електромеханічної характеристики має вигляд:

$$\omega = \frac{K_{ТП} u_K}{\kappa \Phi_H} - \frac{I_{Я} R_{Я\Sigma} - K_{ТП} K_{П.С} I_{Я}}{\kappa \Phi_H}. \quad (4.8)$$

Статизм (стабільність швидкості) замкнутої системи регулювання при номінальному навантаженні δ_{+I} визначають з рівняння (4.8) як відношення перепаду швидкості до кутової швидкості ідеального холостого ходу:

$$\delta_{+I} = \frac{I_{Я.Н} R_{Я\Sigma} (1 - K_{ТП} K_{П.С} / R_{Я\Sigma})}{K_{ТП} u_K}. \quad (4.9)$$

Аналіз рівняння (4.9) показує, що статизм у замкнутій системі може бути рівним 0 за умови $K_{ТП} K_{П.С} / R_{Я\Sigma} = 1$; для значень $K_{ТП} K_{П.С} / R_{Я\Sigma} > 1$ швидкість зростає, тобто спостерігається перекомпенсація за зворотним зв'язком; для значень $K_{ТП} K_{П.С} / R_{Я\Sigma} < 1$ характеристика має від'ємну жорсткість.

Для спрощення процесу моделювання в системі MatLab рівняння (4.6) записують у відносних одиницях:

$$\left. \begin{aligned} e_{ТП}^* (1 + T_{ТП} p) &= K_{ТП} (u_K^* + \frac{i_{Я}^*}{K_{ТП}}); \\ (1 + T_{Я} p) i_{Я}^* &= e_{ТП}^* - \omega^*; \\ T_M \omega^* p &= i_{Я}^* - i_C^*, \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

де $e_{ТП}^*, i_{Я}^*$ – поточні значення електрорушійної сили генератора і струму в якірному колі, в.о.; m^*, m_C^* – поточні значення електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження, в.о.; ω^* – кутова швидкість обертання вала двигуна, в.о.

Параметри системи (4.10) визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} e_{ТП}^* &= \frac{e_{ТП}}{U_{Д.Н}}; \quad u_K^* = \frac{u_K}{U_{Д.Н}}; \quad i_{Я}^* = \frac{i_{Я}}{I_{К.З.Д}}; \quad I_{К.З.Д} = \frac{U_{Д.Н}}{R_{Я\Sigma}}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{0.ПР}}; \\ m_C^* &= \frac{m_C}{M_{К.З.Д}}; \quad m^* = \frac{m}{M_{К.З.Д}}; \quad M_{К.З.Д} = \kappa \Phi_H I_{К.З.Д}, \end{aligned}$$

де $I_{К.З.Д}$, $M_{К.З.Д}$ – відповідно струм, А, і електромагнітний момент, Н·м, короткого замикання двигуна.

На основі системи рівнянь (4.10) складена структурна схема регульованого електропривода з додатним зворотним зв'язком за струмом якоря (рис. 4.1).

Структурна схема має один вхід керування u_K^* . Блок Transfer Fcn моделює ланку ТПН зі сталою часу $T_{TP} = 0,01$ і коефіцієнтом підсилення K_{TP} . Блоки Sum2 і Transfer Fcn 1 моделюють ланку якоря. Блоки Sum 3, Integrator і підсилювач з коефіцієнтом $K=1/T_M$ реалізують третє рівняння системи (4.10). Струм навантаження формується як інтеграл від постійного сигналу (блоки Step 1, підсилювач з коефіцієнтом $K=0,007$ і Integrator 1). Для візуалізації електромеханічної характеристики використовується блок XY Graph (по осі абсцис – струм, по осі ординат – швидкість). Система має блок для встановлення максимального і мінімального діапазону швидкості Saturation і блок для обмеження максимального струму Saturation 1. Зворотний додатний зв'язок за струмом реалізується подачею сигналу з виходу блока Saturation 1 через підсилювач з коефіцієнтом $1/K_{TP}$ на вхідний суматор Sum1.

Аналіз перехідних процесів моменту (струму) та швидкості проводиться на моделі (рис. 4.2).

Модель на рис. 4.2 відрізняється від попередньої (рис. 4.1) тим, що момент (струм) навантаження формується як інтеграл від постійного сигналу (блоки Step1, підсилювач $K=0.007$, Integrator1), а для візуалізації результатів моделювання встановлений осцилограф Scope.

Робота системи ТПН-Д з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю описується такими рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} e_{TP}(1+T_{TP}p) &= K_{TP}(u_K - K_{3.ш}\omega); \\ R_{я\Sigma}(1+T_{я}p)i_{я} &= e_{TP} - \kappa\Phi_H\omega; \\ T_M\beta_{TP-д}\omega p &= (i_{я} - i_C)\kappa\Phi_H, \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

де $K_{3.ш}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, В/(рад/с).

$$K_{3.ш} = u_{KMAX} / \omega_0. \quad (4.12)$$

При статичній рівновазі системи ($p=0$) рівняння електромеханічної характеристики має вигляд:

$$\omega = \frac{K_{TP}u_K}{\kappa\Phi_H + K_{TP}K_{3.ш}} - \frac{I_{я}R_{я\Sigma}}{\kappa\Phi_H + K_{TP}K_{3.ш}}. \quad (4.13)$$



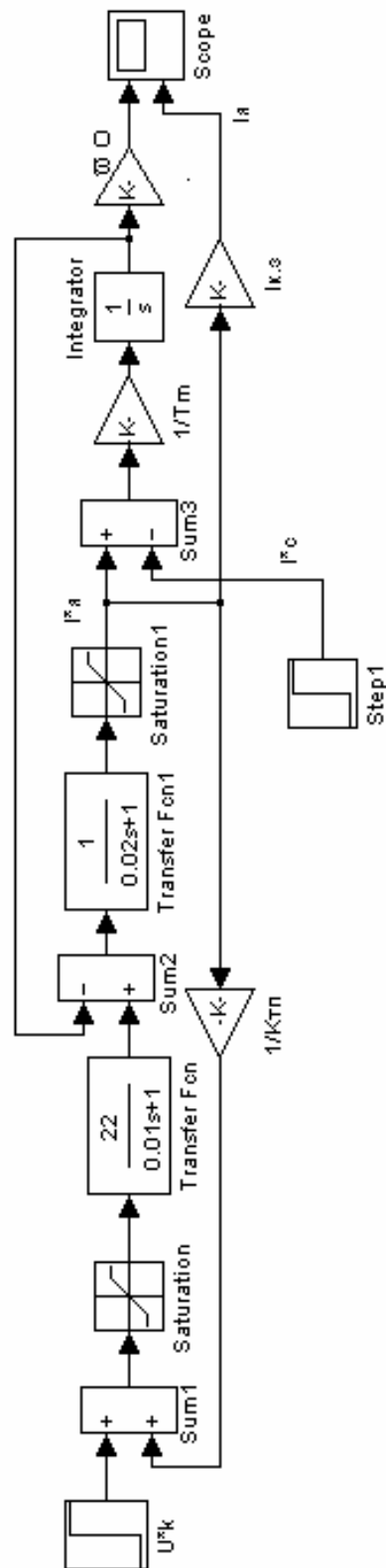


Рис. 4.2. Модель двигуна постійного струму незалежного збудження при постійному магнітному потоці в системі ТПН-Д для аналізу перехідних процесів

Статизм у замкнутій системі з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю $\delta_{-\omega}$ визначається за рівнянням:

$$\delta_{-\omega} = \frac{I_H R_{\Sigma}}{K_{\Pi} u_K}. \quad (4.14)$$

Система рівнянь ТПН-Д з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю у відносних одиницях:

$$\left. \begin{aligned} e_{\Pi}^* (1 + T_{\Pi} p) &= K_{\Pi} (u_K^* - \frac{\omega^*}{K_{\Pi}}); \\ (1 + T_{\Sigma} p) i_{\Sigma}^* &= e_{\Pi}^* - \omega^*; \\ T_M \omega^* p &= i_{\Sigma}^* - i_C^*. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

За аналогією з попередніми моделями (рис. 4.1 і 4.2) на рис. 4.3 і 4.4 наведено моделі для аналізу електромеханічних характеристик та перехідних процесів в електроприводі з від'ємним зворотним зв'язком. Наведені моделі мають додатково універсальний ПІД-регулятор швидкості, який дає можливість настроїти швидкість системи на технічний оптимум або симетричний оптимум.

При настроюванні системи на технічний оптимум регулятор швидкості повинен мати передаточну функцію пропорційної ланки з коефіцієнтом передачі:

$$k_{\omega} = \frac{T_M}{2T_{\mu}}, \quad (4.16)$$

де T_{μ} – мала некомпенсована постійна часу, с.

$$T_{\mu} = \frac{1}{mf}, \quad (4.17)$$

де f – частота струму мережі, Гц; m – число, яке визначається як добуток числа фаз на кількість півперіодів ($m=2$).

При настроюванні системи на симетричний оптимум за швидкістю необхідно вибрати ПІ-регулятор з коефіцієнтами:

$$\text{пропорційний } k_{\Pi} = \frac{T_M}{2T_{\mu}}; \quad (4.18)$$

$$\text{інтегральний } k_I = \frac{T_M}{8T_{\mu}^2}. \quad (4.19)$$

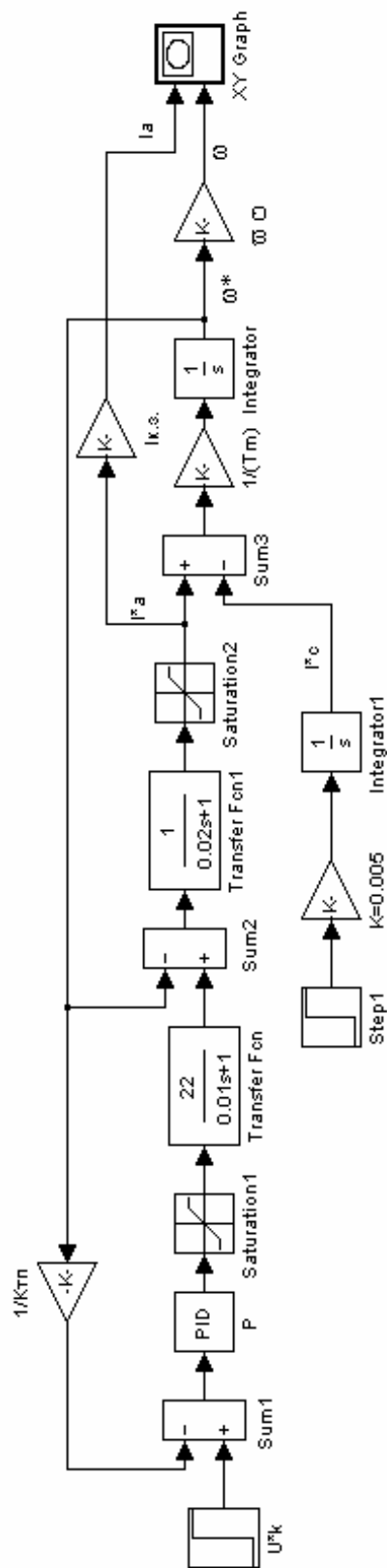


Рис. 4.3. Структурна схема замкнутої системи ТПН-Д з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю для аналізу електромеханічних характеристик

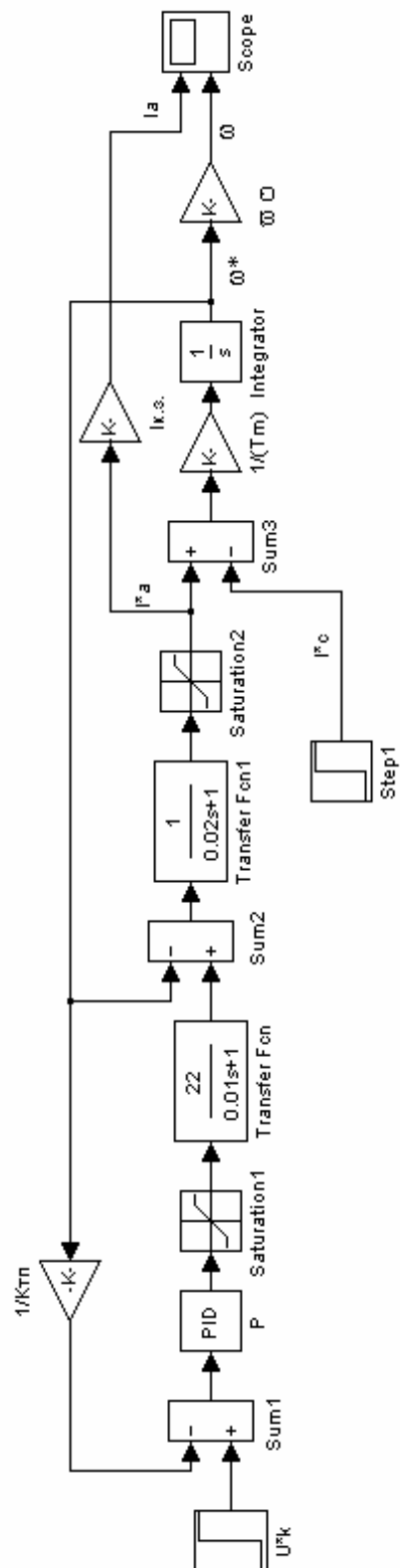


Рис. 4.4. Модель двигуна постійного струму незалежного збудження при постійному магнітному потоці в системі ТПН-Д з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю для аналізу перехідних процесів

Коефіцієнт корисної дії двигуна в замкнутій системі керування ТПН-Д (без врахування втрат у колі збудження) дорівнює відношенню фактичної швидкості ω_ϕ до швидкості ідеального холостого ходу на заданій характеристиці ω'_0 :

$$\eta = \frac{\omega_\phi}{\omega'_0} 100\% . \quad (4.20)$$

Віртуальна модель електропривода з керованим випрямлячем наведена на рис. 4.5.

Модель складається з віртуальної машини постійного струму DC-Machine, трифазного двохнапівперіодного керованого випрямляча (KB) Thyristor Converte, джерела живлення та вимірювальних блоків.

Модель рекомендується використовувати для дослідження енергетичних характеристик електропривода. Для цього використані вимірювальні прилади RMS та Fourier, взяті з розширеної бібліотеки Powerlib Extras в розділі Measurement.

Настроювання блоків віртуальної моделі описані в лабораторних роботах № 1 та 3.

Система регульованого електропривода постійного струму на базі широтно-імпульсного перетворювача (ШІП-Д).

Система електропривода з ШІП подібна системі з керованим випрямлячем. Модель електропривода з ШІП можна створити з використанням як функціональних, так і віртуальних блоків. Функціональна модель реалізується структурною схемою, що складена за рівняннями, які описують двигун, а віртуальна модель – віртуальними блоками з бібліотеки Sim Power Systems (рис. 4.6).

Модель складається з віртуальної машини постійного струму DC-Machine, віртуального ШІП Universal Bridge з блоком керування Control system, джерела живлення та вимірювальних блоків.

Настроювання блоків віртуальної моделі описані в лабораторних роботах № 2 та 3.

Узгодження регуляторів швидкості Р і струму РІ (коефіцієнти розраховуються у відносних одиницях, а параметри віртуальної машини задані в іменованих величинах) здійснено підсилювачами в колах зворотного зв'язку (Gain, Gain1). Значення коефіцієнтів підсилювачів відповідають зворотним значенням відповідних базових величин.

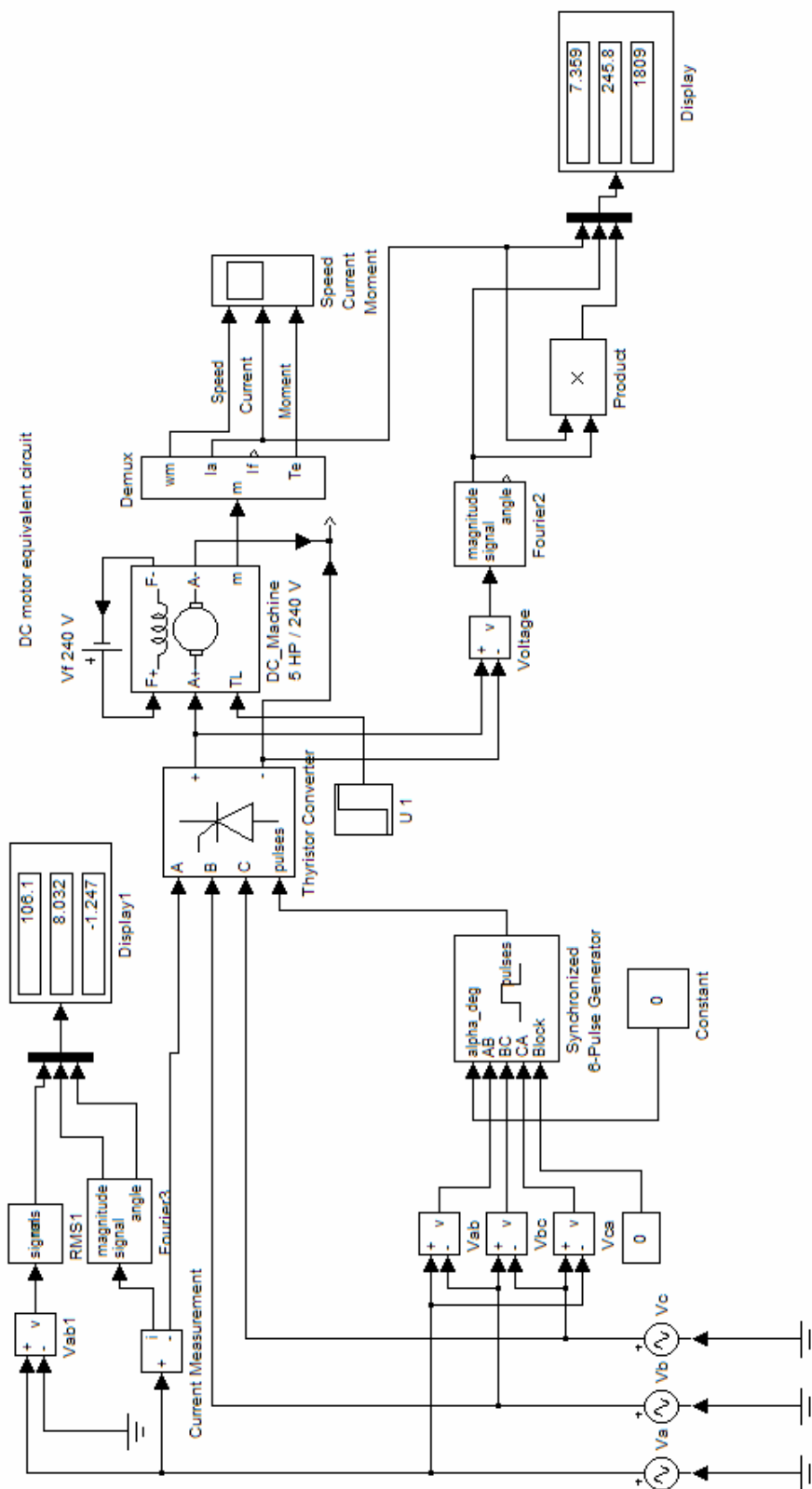


Рис. 4.5. Віртуальна модель електропривода з керованим випрямлячем

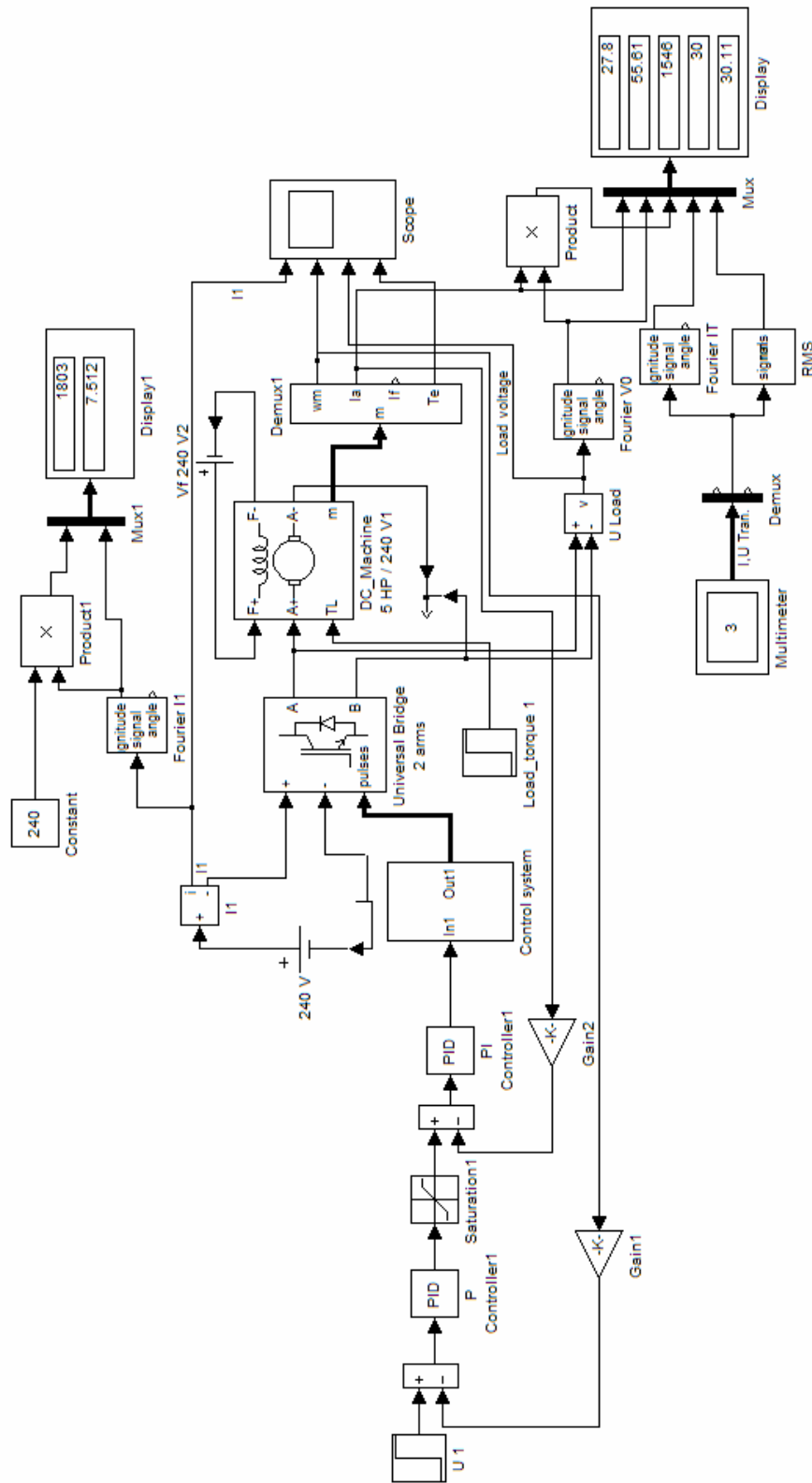


Рис. 4.6. Віртуальна модель електропривода постійного струму з ШПП

Регулятори струму і швидкості розраховуються аналогічно як і для електропривода з керованим вентилем. При цьому за некомпенсовану постійну часу T_{μ} необхідно прийняти період комутації ШПП, який рівний періоду напруги ГПН. Період ГПН T_0 визначається за допомогою блока Scope (рис. 4.6) по осцилограмі Load Voltage (рис. 4.7) на осі абсцис, тобто при напрузі 0 В.

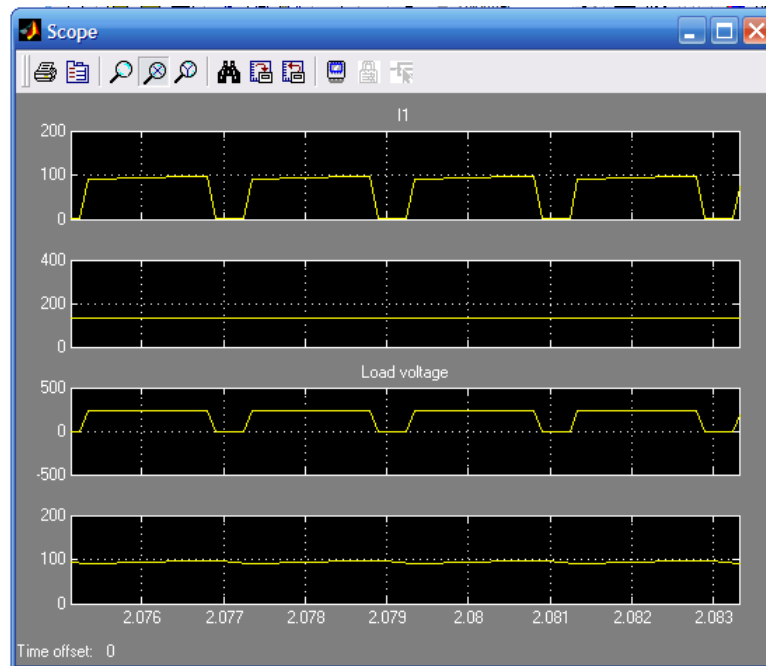


Рис. 4.7. Миттєві значення струму живлення I_1 , швидкості двигуна ω , струму якоря I_2 , електромагнітного моменту двигуна M

Вказівки щодо виконання роботи

Створити вказану викладачем модель регульованого електропривода. Розрахувати параметри двигуна, перетворювального пристрою та регуляторів і записати їх в поля вікна налаштування.

Провести аналіз електромеханічних $\omega = f(I)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик регульованого електропривода та перехідних процесів запуску двигуна $i = f(t)$; $m = f(t)$ та $\omega = f(t)$ без навантаження і з навантаженням $M_c = M_{c.H}$. Навести осцилограми.

На віртуальних моделях при визначенні механічних і розрахунку робочих характеристик двигуна з незалежним і паралельним збудженням в режимі двигуна і генератора у вікні настроювання блока завдання моменту послідовно задається значення моменту від - 1,2 до $1,2M_H$ з кроком $0,2M_H$. Для двигуна з послідовним збудженням значення моменту задається від 0,2 до $1,2M_H$. Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється табл. 4.1.

Розрахункові дані табл. 4.1 визначаються так:

а) споживана потужність

- для моделі (рис. 4.5):

$$P_1 = \frac{3U_1 \cdot I_1(1)_{MAX}}{\sqrt{2}} \cos \varphi_1, \quad (4.21)$$

де U_1 – діюче значення фазної напруги джерела живлення (верхнє значення блока Display 1), В; $I_1(1)_{MAX}$ – максимальне значення струму живлення за першою гармонікою (середнє значення блока Display 1), А; φ_1 – початкова фаза струму $I_1(1)_{MAX}$ (нижнє значення блока Display 1), град.

- для моделі (рис. 4.6) P_1 визначається за верхнім значенням блока Display 1;

б) корисна потужність P_2 визначається за показами блока Display (нижнє значення для рис. 4.5, третє зверху – для рис. 4.6), Вт;

в) коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{– режим двигуна (навантаження позитивне);} \quad (4.23)$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \quad \text{– режим генератора (навантаження від'ємне).} \quad (4.24)$$

Дослідження характеристик при різних напрузі живлення в колі якоря проводиться для двох значень напруги на якоря $0,6U_{НОМ}$ і $0,8U_{НОМ}$. При цьому момент навантаження змінюють аналогічно попередньому досліді. Результати моделювання заносяться в табл. 4.1.

4.1. Механічні та робочі характеристики машини ($U_{я} = U_{я.ном}$)

Момент навантаження M_C		Вимірювання			Розрахунок			Режим роботи
в.о.	В	ω , рад/с	$I_{я}$, А	I_3 , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , в.о.	
-1,2								Генератор
-1,0								
-0,8								
-0,6								
-0,4								
-0,2								
0,0								Двигун
0,2								
0,4								
0,6								
0,8								
1,0								
1,2								

Дослідження регульовальних характеристик проводиться з постійним моментом навантаження $M_C = M_{ном}$ і при зміні напруги на якорі від $0,4$ до $1,2U_{я.ном}$ з кроком $0,2U_{я.ном}$. Для кожного значення напруги проводиться моделювання і результати заносяться в табл. 4.2.

4.2. Регульовальна характеристика двигуна

$U_{я}$		ω , рад/с
в.о.	В	
0,4		
0,6		
0,8		
1,0		
1,2		

За результатами досліджень побудувати залежності:

- механічні характеристики $\omega = f(M)$;
- робочі характеристики $\omega = f(P_2)$; $I = f(P_2)$; $M = f(P_2)$;
 $P_1 = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$;
- регулювальну характеристику $\omega = f(U_{\text{я}})$.

Визначення показників регулювання.

Для визначення діапазону регулювання будують дві механічні характеристики: одну – при номінальній напрузі на двигуні, другу – при напрузі, коли $M_{\text{к.з}} = 2M_{\text{н}}$. Швидкість при номінальному навантаженні на першій характеристиці відповідає ω_{MAX} , на другій – ω_{MIN} .

Діапазон регулювання визначають за рівнянням:

$$D = \frac{\omega_{\text{MAX}}}{\omega_{\text{MIN}}}. \quad (4.25)$$

Визначення статизму (стабільності швидкості) для замкнутої системи регулювання проводять за рівнянням (4.9 або 4.14), для розімкненої системи – за рівнянням:

$$\delta = \frac{R_{\Sigma}}{(\kappa \Phi_{\text{н}})^2}. \quad (4.26)$$

ДОДАТКИ

Додаток 1

1. Параметри швидкодіючих високочастотних тиристорів
марки ТЧ16, ТЧ25, ТЧ40, ТЧ63, ТЧ80, ТЧ100, ТЧ125

Параметр	ТЧ16	ТЧ25	ТЧ40	ТЧ63	ТЧ80	ТЧ100	ТЧ125
Максимальний струм $I_{доп}$, А	16	25	40	63	80	100	125
Максимальна напруга $U_{доп}$, В: клас 1	100						
2	200						
3	300						
4	400						
5	500						
6	600						
7	700						
8	800						
9	900						
10	1000						
Максимальна швидкість наростання прямої напруги du/dt , В/мкс	100						
Максимальна швидкість наростання прямого струму di/dt , А/мкс	100						
Динамічний опір тиристора у відкритому стані R_T , Ом	0,7	0,46	1,6	0,6	1,20	1,10	1,00
Час вмикання $t_{вм}$, мкс	6						
Час вимикання $t_{вим}$, мкс, в т.ч.: час спадання струму до рівня 0,1 від струму в момент вимикання	20						
час затягування	6						
	14						
Порогова напруга U_0 , В	1,16	1,00	1,80	1,50	1,2	1,2	1,01

Продовження додатку 1

2. Параметри швидкодіючих динамічних тиристорів
марки T5-160, T5-200, TB5-250, TB5-320

Параметр	T5-160	T5-200	TB5-250	TB5-320
Максимальний струм $I_{Доп}$, А	160	200	250	320
Максимальна напруга $U_{Доп}$, В: клас 3 4 5 6 7 8 9 10	300 400 500 600 700 800 900 1000			
Максимальна швидкість наростання прямої напруги du/dt , В/мкс: клас 3 4 5	100 200 500			
Максимальна швидкість наростання прямого струму di/dt , А/мкс: клас 3 4	70 100			
Динамічний опір тиристора у відкритому стані R_T , 10^{-3} Ом	90,5	65,0	62,0	43,5
Час вмикання t_{BM} , мкс	7			
Час вимикання t_{BIM} , мкс, : клас 5 6 7 8 9	50 30 20 15 12			
Порогова напруга U_0 , В	1,51	1,24	1,69	1,42

Продовження додатку 1

3. Рекомендована робоча напруга U_P
для силових напівпровідників різних типів і класів

Клас	$U_{доп}, В$	$U_P, В$	
		Діоди	Тиристори
1	100	65	80
2	200	135	160
3	300	200	240
4	400	270	320
5	500	335	400
6	600	400	480
7	700	470	560
8	800	530	640
9	900	600	720
10	1000	670	800

Параметри повнокерованих тиристорів марки GTO

Параметр	5SGA06D4502	TG 907-630-20	TG 907-800-25	TG 918-1200-30
Струм I , А	600	630	800	1200
Напруга U , В	4500	2000	2500	3000
Динамічний опір тиристора у відкритому стані R_T , 10^{-3} Ом	3,5	90,5	65,0	62,0
Максимальна швидкість наростання прямого струму di/dt , А/мкс	20	35	35	35
Максимальна швидкість наростання прямої напруги du/dt , В/мкс:	-	200	200	200
Порогова напруга U_0 , В	1,9	2,0	2,0	2,0
Час вмикання t_{BM} , мкс	4,5	4	4	4
Час вимикання, в т.ч.:				
час спадання, мкс	5	5	5	5
час затягування, мкс	15	10	10	10
Параметри демпфуючої ланки:				
C_D , мкФ	1,0	-	-	-
R_D , Ом	10	-	-	-
L_D , мкГн	0,15	-	-	-

Додаток 3

Параметри біполярних транзисторів з ізольованим затвором
(закордонна аббревіатура – IGBT)

Позначення	Напруга пробою колектор-емітера, В	Порогова напруга, В	Постійний струм колектора, А	Піковий струм колектора, А	Потужність розсіювання, Вт	Час спаду, мкс	Динамічний опір транзистора у відкритому стані, Ом
HGTP6N50E1D	500	2...4,5	6	7,5	75	1,0	0,003...1,2
HGTP10N50C1D	500		10	-	75	0,5	
HGTG12N60D1D	600		12	48	75	0,6	
HGTG15N120C3D	1200		15	120	164	0,4	
HGTH20N50E1D	500		20	35	100	1,0	
HGTG24N60D1D	600		24	96	208	0,6	

Технічні показники тиристорних перетворювачів постійної напруги серії Lenze EVD-XXX-E

Показник	Позначення	Значення										
Тип	EVD-XXX-E	531	532	533	534	472	473	481	482	483		
Вихідна потужність, кВт	P	0,36		0,72	1,36	2,04	2,50	7,00	10,0	22,0	44,0	
Частота струму мережі, Гц	f	50...60										
Напруга мережі, В	U	220			220/380							
Струм якоря, А	I _я	2	4	8	12	16	27	23	50	100		
Напруга збудження, В	U _з	0,9U										
Максимальний струм збудження, А	I _з	0,3	0,6	1,5	3,5	3,5	10,0	10,0	10,0	10,0		
Максимальна керуюча напруга, В	U _к	10										
Напруга тахогенератора, В	U _{тг}	10...120										
Час розгону, с	t	1...10										
Нижня межа швидкості, об/хв.	n _{MIN}	(0...0,25)n _{НОМ}										
Верхня межа швидкості, об/хв.	n _{MAX}	(0,75...1)n _{НОМ}										
Корекція швидкості	“I·R” k _ω	Компенсація “I·R” Від’ємний зворотний зв’язок за швидкістю										

1. Технічні характеристики двигунів постійного струму серії 2П незалежного збудження

№ п/п	Р _н , кВт	U _н , В	п _н , об/хв	п _{макс} , об/хв	ККД, %	Р _я , Ом	L _я , мГн	U _{з.н} , В	R _з , Ом	J, кг·м ²	m, кг
2ПН90МГУХЛ4											
1	0,17	110	750	3000	47,5	10,24	128	220	610	0,04	29
2	0,17	220	750	1500	48,5	43,4	514	110	162	0,04	29
3	0,25	220	1120	2000	57,0	26,67	297	220	610	0,04	29
4	0,71	220	2360	3540	70,0	6,54	79	220	470	0,04	29
5	1,00	110	3000	4000	71,5	0,95	12	110	92	0,04	29
6	1,00	220	3000	4000	72,5	3,99	48	220	365	0,04	29
2ПН100МГУХЛ4											
7	0,50	220	1000	2000	66,0	11,67	222	220	470	0,011	41
8	0,75	110	1500	4000	71,0	1,38	26	110	103	0,011	41
9	1,20	110	2120	4000	75,0	0,79	14	220	103	0,011	41
10	1,20	220	2200	4000	76,5	2,72	53	220	359	0,011	41
11	2,00	220	3000	4000	79,0	1,38	26	220	265	0,011	41

№ п/п	Р _н , кВт	U _н , В	n _н , об/хв	n _{МАХ} , об/хв	ККД, %	Р _я , Ом	L _я , мГн	U _{3н} , В	R ₃ , Ом	J, кг·м ²	m, кг
2ПН112МГУХЛ4											
12	0,60	220	800	2500	60,5	9,57	58	220	233	0,015	49
13	1,50	220	1500	4000	70,0	3,32	19,5	220	181	0,015	49
14	2,50	220	2200	4000	76,0	1,47	9,3	220	156	0,015	49
15	3,6	220	3000	4000	79,0	0,78	4,8	220	129	0,015	49
2ПН132ЛГУХЛ4											
16	1,90	220	750	2500	72,0	2,28	28,3	220	138	0,038	91
17	3,00	110	950	4000	74,5	0,42	4,5	110	37,5	0,038	91
18	3,00	220	1000	4000	75,5	1,52	18,1	220	138	0,038	91
19	5,50	220	1500	4000	80,5	0,59	7	220	101	0,038	91
20	8,50	220	2200	4000	84,0	0,29	3,5	220	89	0,038	91
2ПБ132ЛГУХЛ4											
21	1,30	220	800	2500	72,0	3,36	43	220	216	0,038	91

Продовження табл. 1

№ п/п	Р _н , кВт	U _н , В	п _н , об/хв	п _{мах} , об/хв	ККД, %	Р _я , Ом	Л _я , Гн	U _{з.н} , В	R _з , Ом	J, кг·м ²	m, кг
22	1,90	220	1060	3000	76,5	2,00	26	220	216	0,038	91
23	3,20	220	1600	4000	82,5	0,84	11,6	220	216	0,038	91
24	4,50	220	2200	4000	84,0	0,49	6,5	220	189	0,038	91
25	5,30	220	3000	4000	85,5	0,29	4	220	216	0,038	91
2ПН160МГУХЛ4											
26	3,00	220	750	2500	76,5	1,22	20,2	220	128	0,083	147
27	4,50	220	1000	3000	79,5	0,71	10,5	220	108	0,083	147
28	7,50	220	1500	4000	83,0	0,32	5	220	82	0,083	147
2ПН160ЛГУХЛ4											
29	4,00	220	800	2500	78,5	0,86	14,7	220	117	0,083	147
30	6,30	220	1000	3000	81,5	0,48	8,7	220	87,6	0,083	147
31	11,0	220	1500	4000	85,5	0,17	3,1	220	65,3	0,083	147
32	16,00	220	2360	4000	86,5	0,08	1,4	220	49,4	0,083	147

2. Технічні характеристики двигунів постійного струму серії ДП-12 послідовного збудження

№ п/п	Тип	P _н , кВт	U _н , В	n _н , об/хв	n _{макс} , об/хв	ККД, %	R _я , Ом	L _я , Гн	R _з , Ом	J, кг·м ²	m, кг
Тихохідні											
33	ДП-12	3,00	220	960	3300	0,72	1,43		0,59	0,05	125
34	ДП-21	4,50	220	900	3200	0,73	0,94		0,275	0,125	190
35	ДП-22	6,00	220	850	3000	0,76	0,566		0,30	0,155	215
36	ДП-31	8,50	220	770	2600	0,77	0,423		0,118	0,30	295
37	ДП-32	12,00	220	675	2500	0,80	0,266		0,098	0,425	350
Бистрохідні											
38	ДП-21	5,50	220	1200	2500	0,76	0,531		0,0275	0,125	190
39	ДП-22	8,00	220	1200	2500	0,79	0,322		0,19	0,155	215
40	ДП-31	12,00	220	1100	2500	0,81	0,194		0,118	0,30	295
41	ДП-32	17,00	220	1000	2000	0,84	0,125		0,06	0,425	350
42	ДП-41	23,00	220	970	2000	0,84	0,072		0,053	0,80	520

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія електропривода: Підручник/М.Г.Попович, М.Г.Борисюк, В.А.Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г.Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
6. Черных И.В. SIMULINK: среда созданий инженерных приложений/ Под общ. ред. В.Г.Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

ЗМІСТ

Загальна частина	3
Основи комп'ютерного моделювання електропривода в системі MatLab	3
Лабораторна робота №1. Дослідження енергетичних характеристик керованого вентиля на моделі в системі MatLab	19
Лабораторна робота №2. Дослідження енергетичних характеристик мостового широтно-імпульсного перетворювача	42
Лабораторна робота №3. Дослідження механічних характеристик двигунів постійного струму	60
Лабораторна робота №4. Дослідження регульованого електропривода постійного струму	76
Додатки	93
Список літератури	103