

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”

**ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТА СПРОЩЕНИЙ РОЗРАХУНОК  
ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ  
ЗМІННОГО СТРУМУ**

Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт  
для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності  
7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод"

**Рекомендовано Вченою Радою факультету електроенерготехніки та авто-  
матики**

**Протокол № від листопада 2013 р.**

Київ  
НТУУ „КПІ”  
2013

Функціональна схема та спрощений розрахунок силового перетворювача електроприводу змінного струму. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2013 р. 22 с.

### Навчальне видання

#### ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТА СПРОЦЕННИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ

Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод"

Укладач: С.М.Ковбаса, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний

редактор: В.І.Теряєв, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: М.Г.Анпілогов, канд. техн. наук, доц.

## ЗМІСТ

1. Типові вимоги до перетворювачів та функціональна схема асинхронного електроприводу.....	4
2. функціональна схема керуючого контролера.....	9
3. Загальна інформація про датчики струму на ефекті Холла та фото-імпульсні датчики швидкості (енкодери).....	11
3.1 Вимірювання струму та напруги в силових перетворювачах.....	11
3.2 Вимірювання кутової швидкості та положення .....	15
Перелік посилань.....	22

# 1. ТИПОВІ ВИМОГИ ДО ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

На основі аналізу технічних характеристик сучасних перетворювачів частоти основних закордонних виробників, таких як Alien Bradley, Siemens, ABB, Danfoss, Mitsubishi та ін., можна сформувати наступні загальні вимоги, які ставляться кінцевим споживачем до перетворювальних пристроїв асинхронних електроприводів:

напруга живлення – 3 ф, ~380 В, 50 Гц або 1 ф, ~220 В, 50 Гц;  
вихідна частота 0...400 Гц.

Алгоритми керування що реалізуються перетворювачами:

- традиційне частотне керування з квадратичною або лінійною  $U/f$  характеристикою з можливістю IR-компенсації та компенсації ковзання;
- векторне бездатчикове керування;
- векторне керування з датчиком швидкості.

В стандартній конфігурації електропривод має забезпечувати наступні мінімальні інтерфейсні можливості:

- кількість дискретних гальванічно-розв'язаних входів – 6;
- кількість аналогових входів 0...10 В – 1 канал, 4...20мА – 1 канал;
- аналоговий вихід 0...10 В;
- кількість виходів релейного типу – 2;
- гальванічно розв'язані інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, CAN;
- вбудований ПД-регулятор технологічного параметру;
- внутрішній ключ клампера на малих потужностях (до 15 кВт);
- можливість підключення фотоімпульсного датчика швидкості (енкодера);
- наявність джерел живлення +10 В та +24 В для обслуговування зовнішніх підключень аналогових та дискретних сигналів.

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму,

побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, показана на рис. 1.1. Як видно з рис. 1.1, основу асинхронного електроприводу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний та керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу. З цієї причини, досить часто перетворювачі частоти називають електроприводами, хоча в загальному випадку це некоректно.

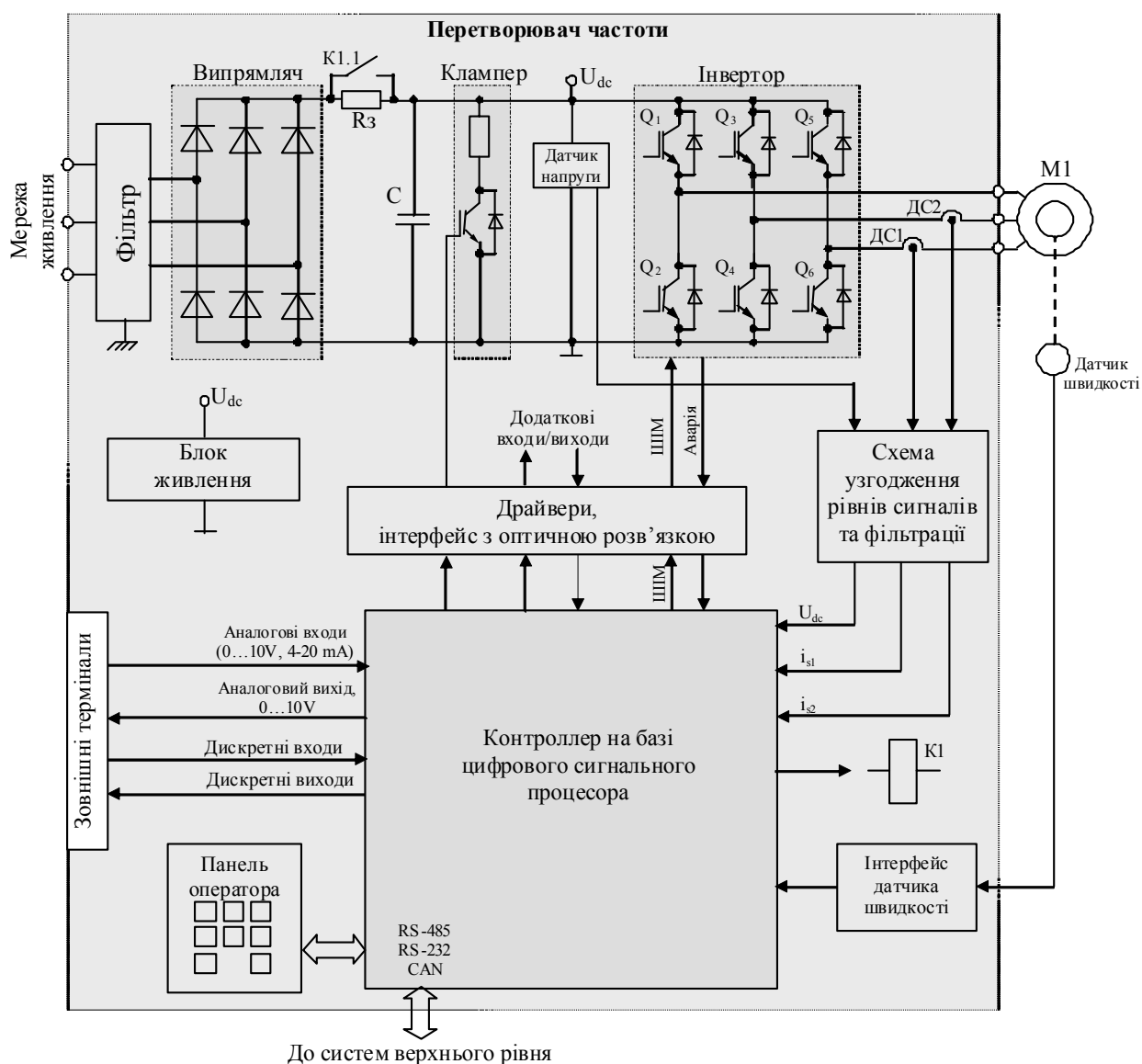


Рис. 1.1 - Функціональна схема асинхронного електроприводу

У стандартному перетворювачі можна виділити дві основні складові: силову частину, до якої входять вхідний фільтр, некерований випрямляч, зарядне коло, ємність фільтру випрямляча, клампер, датчик напруги ланки по-

стійного струму, інвертор, датчики вихідного струму, схеми драйверів та гальванічної розв'язки сигналів керування ключами інвертора і клампера, блок живлення;

керуючий контроллер, до якого входять власне цифровий контроллер, який, як правило, базується на цифровому сигнальному процесорі, та схеми узгодження сигналів.

Розглянемо більш детально призначення основних модулів та елементів, показаних на рис. 1.1.

**Фільтр** – як правило включає дві основні складові: варистори для запобігання перенапругам в ланці постійного струму внаслідок сплесків напруги мережі живлення, та фільтр радіоперешкод, який запобігає розповсюдженню в мережу живлення високочастотних перешкод, які виникають при комутації ключів інвертора.

**Випрямляч** – перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ .

**Ємність С** – фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

**Зарядне коло** (резистор  $R_z$  та реле  $K1$ ) – забезпечують плавний заряд ємності фільтру випрямляча  $C$  при подачі живлення на перетворювач. Після закінчення заряду контакт реле  $K1.1$  замикається.

**Клампер** – пристрій, призначений для стабілізації напруги в ланці постійного струму при генераторних режимах роботи двигуна, які супроводжуються рекуперацією енергії в ланку постійного струму.

**Датчик напруги** – призначений для передачі в керуючий контроллер інформації про напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ , де вона використовується для забезпечення захисних функцій, контролю заряду ємності фільтру випрямляча, а також для генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

**Інвертор** – перетворює постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої

(усереднений на періоді ШІМ) має заданий модуль, частоту та кутове положення.

**Датчики струму** ДС1, ДС2 – призначені для передачі в керуючий контролер інформації про фазні струми двигуна, де вона використовується для організації захисних функцій інвертора та двигуна, а також для організації зворотних зв'язків в системах векторного керування.

**Датчик швидкості** – призначений для вимірювання контролером кутової швидкості (положення) з метою організації зворотних зв'язків та захисних функцій.

**Драйвери** – перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання IGBT ключів. Фактично драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Досить часто драйвери додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання інвертора.

**Опторозв'язка** – забезпечує гальванічну розв'язку дискретних сигналів керування з метою підвищення перешкодозахищеності керуючого контролера, а також для запобігання виходу його з ладу при аварійних режимах в силовій частині. Виконується за допомогою оптопар, або оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності.

**Керуючий контролер** – виконує всі функції автоматизації перетворювача, отримання завдання на регульовані координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

**Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації** – необхідні для приведення рівнів сигналів, які отримуються від датчиків струму та напруги до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Фільтрація може застосовуватися для підвищення завадостійкості системи керування.

**Інтерфейс датчика швидкості** – дозволяє підключати до контролера фото імпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило

містить гальванічну розв'язку.

**Блок живлення** – пристрій який забезпечує живлення власних потреб перетворювача: живлення контролера, драйверів, зовнішні +10 В та +24 В, живлення датчиків та ін. В сучасних перетворювачах вхідна напруга для блоку живлення власних потреб береться від ланки постійного струму, що забезпечує безпечну зупинку системи при зникненні напруги мережі живлення.

**Зовнішні термінали** – служать для підключення до перетворювача дискретних входів/виходів (наприклад сигналів керування перетворювачем «Пуск», «Стоп», «Реверс», інших), аналогових входів/виходів (наприклад задання швидкості, зворотного зв'язку за технологічним параметром та інших).

**Панель оператора** – призначена для налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

**Додаткові входи виходи** – призначені для керування додатковими системами, наприклад для включення вентиляторів системи охолодження, контролю спрацювання зарядного реле та ін.



## 2. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА КЕРУЮЧОГО КОНТРОЛЕРА

Функції, які виконуються керуючим контролером в електроприводі змінного струму визначають вимоги до його апаратної та програмної частини і умовно можуть ділитися на наступні групи:

функції керування – включають розрахунок алгоритмів керування електричною машиною, генерування імпульсів керування ключами інвертора, розрахунок регуляторів технологічних параметрів та інші. Функції керування виконуються в режимі реального часу, тому вони в значній мірі визначають вимоги до швидкодії процесорного пристрою. Додатково до функцій керування можна віднести вимірювання та обробку сигналів зворотних зв'язків;

функції автоматизації – включають в себе керування елементами перетворювача (зарядним реле, системою охолодження, ін.), виконання захисних функцій, отримання та обробка команд по каналам дискретних входів або від віддалених систем, формування станів дискретних виходів та аналогових сигналів, аналіз сигналів від зовнішніх аналогових входів;

інтерфейсні функції – обмін інформацією з панеллю оператора та системами верхнього рівня.

З урахуванням вимог до сучасних електроприводів та розглянутих функцій керуючого контролера, його типова функціональна схема матиме вид, представлений на рис. 2.2. На рис. 2.2 сірим кольором виділено спеціалізовану частину, яка містить модулі, необхідні для керування електромеханічними системами.

Ядро контролера – виконує всі необхідні обчислення та маніпуляції з даними.

Енергонезалежна пам'ять програм – містить програму, за якою працює керуючий контролер. Як правило вміст цієї пам'яті є недоступним для зміни кінцевим користувачем.

Оперативна пам'ять – має стандартне призначення, тобто в ній зберігаються різноманітні робочі дані, значення змінних системи та інша оперативна

інформація. Вміст оперативної пам'яті втрачається після зняття живлення контролера.

Енергонезалежна пам'ять параметрів – призначена для збереження налаштувань системи, які здійснюються кінцевим користувачем. Наприклад параметри підключеного двигуна, час розгону/гальмування тощо.

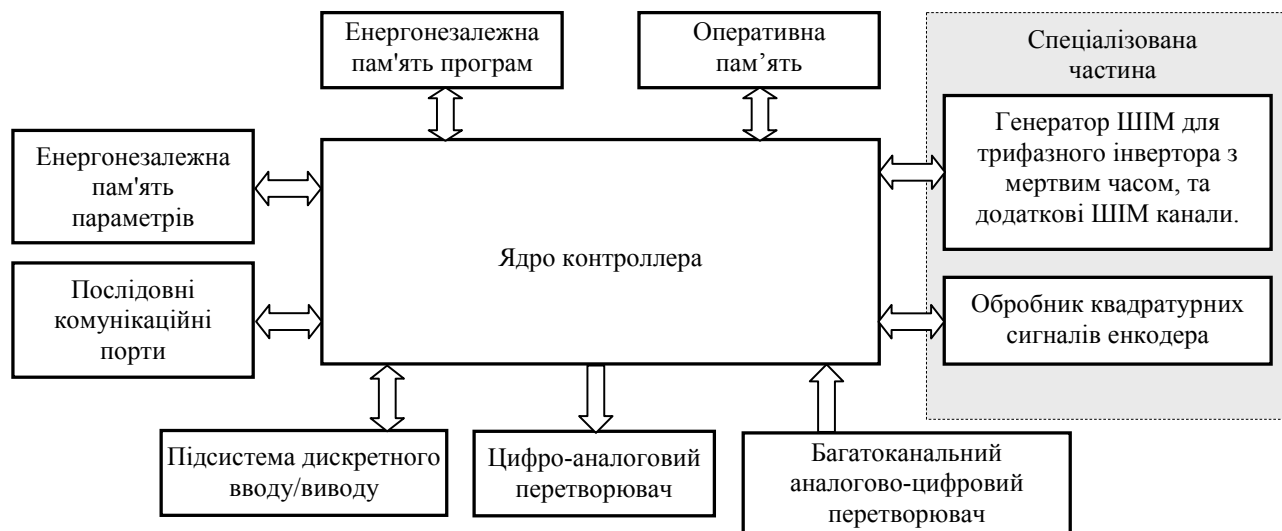


Рис. 2.2 - Типова функціональна схема керуючого контроллера

Генератор ШІМ для трифазного інвертора з «мертвим часом» – забезпечує формування шести імпульсів керування силовими ключами інвертора, при цьому імпульси формуються як три компліментарні пари (одна пара на кожне плече інвертора). Імпульси кожної з пар мають регульований «мертвий час».

Додаткові ШІМ канали – призначені для керування ключем клампера, формування аналогового виходу та ін.

Аналогово-цифровий перетворювач – для перетворення аналогової інформації, що надходить від датчиків та задаючих елементів у цифрову форму.

Цифро-аналоговий перетворювач – як правило використовується для організації аналогового виходу з перетворювача частоти.

Підсистема дискретного вводу/виводу – набір дискретних входів/виходів для виконання необхідних функцій автоматизації, як внутрішніх так і зовнішніх (по відношенню до перетворювача частоти).

Послідовні комунікаційні порти – забезпечують апаратну підтримку інтерфейсних функцій керуючого контроллера.

### **3. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ДАТЧИКИ СТРУМУ НА ЕФЕКТІ ХОЛЛА ТА ФОТО-ІМПУЛЬСНІ ДАТЧИКИ ШВИДКОСТІ (ЕНКОДЕРИ)**

#### **3.1 Вимірювання струму та напруги в силових перетворювачах**

В сучасних електроприводах, побудованих на основі транзисторних перетворювачів з ШІМ, до систем вимірювання струму ставляться вимоги високої швидкодії та наявності гальванічної розв'язки між силовим колом та інформаційним сигналом.

Розглянемо три пристрої для вимірювання струму, які забезпечують гальванічну розв'язку каналу вимірювання:

трансформатори струму;

датчики струму на ефекті Холла;

аналогові датчики з гальванічною розв'язкою.

Трансформатор струму, приклад схеми включення якого показано на рис. 3.1 є найбільш простим пристроєм для вимірювання струму. Перевагами трансформаторів струму є простота конструкції, наявність гальванічної розв'язки, висока перешкодозахищеність внаслідок формування струмового сигналу на виході. До недоліків відносяться: низька точність при вимірюванні струму на малих частотах та при широких діапазонах вимірювання, неможливість вимірювання постійного струму, погані масо-габаритні показники. Наявність вказаних недоліків суттєво обмежує, а в більшості випадків унеможливає застосування трансформаторів струму в сучасних регульованих електроприводах.

Іншим способом вимірювання великих струмів є застосування датчиків Холла відкритого та компенсаційного типу. Принцип дії цих датчиків базується на ефекті, який був відкритим Едвардом Холлом у 1879 році і ілюструється рис. 3.2. Ефект полягає в наступному: якщо через провідник, який знаходиться в магнітному полі, пропускати струм, напрям якого є перпендикулярним магнітному полю, то з боку магнітного поля на електрони в провіднику діє сила, яка від-

хилляє їх в поперечному напрямку, внаслідок чого виникає поперечна електро-рушійна сила (ЕРС), яку називають ЕРС Холла. ЕРС Холла є перпендикулярною струму і магнітному полю і є прямо пропорційною величині струму та магнітного поля.

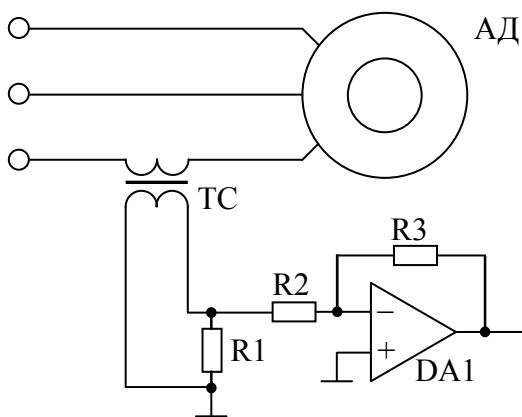


Рис. 3.1 - Схема включення трансформатора струму

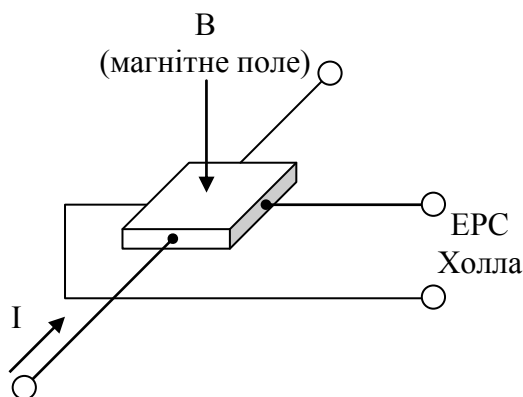


Рис. 3.2 - Ефект Холла

Існують два основних різновиди датчиків на ефекті Холла для вимірювання струму і напруги: відкритого і компенсаційного типу.

Конструкція датчика відкритого типу показана на рис. 3.3. Провідник зі струмом пропускається через отвір магнітного осердя. При протіканні струму через провідник в осерді створюється магнітне поле, лінії якого пронизують чутливий елемент – безпосередньо датчик Холла. За допомогою операційного підсилювача DA1 отримана з датчика Холла ЕРС підсилюється до необхідного рівня.

Очевидно, що датчик Холла (рис. 3) забезпечує гальванічну розв'язку, так як вимірювання здійснюється за посередництвом магнітного поля, без наявності

ті електричного контакту датчика з елементами, через які протікає вимірюваний струм. Вихідна напруга датчика відкритого типу пропорційна напруженості магнітного поля. Відповідно одним з недоліків датчиків відкритого типу, є вплив на покази вимірювань гістерезису магнітного осердя, тобто можливість існування зсуву нуля вихідного сигналу при нульовому струмі на вході.

Датчики компенсаційного типу на виході формують струм, який протікає через обмотку зворотного зв'язку і компенсує вихідний магнітний потік (див. рис. 3.4). Цей же струм є вихідним сигналом датчика, пропорційним вимірюваному струму. Датчики компенсаційного типу працюють при нульовому потоку в осерді і тому є менш чутливі до гістерезису.

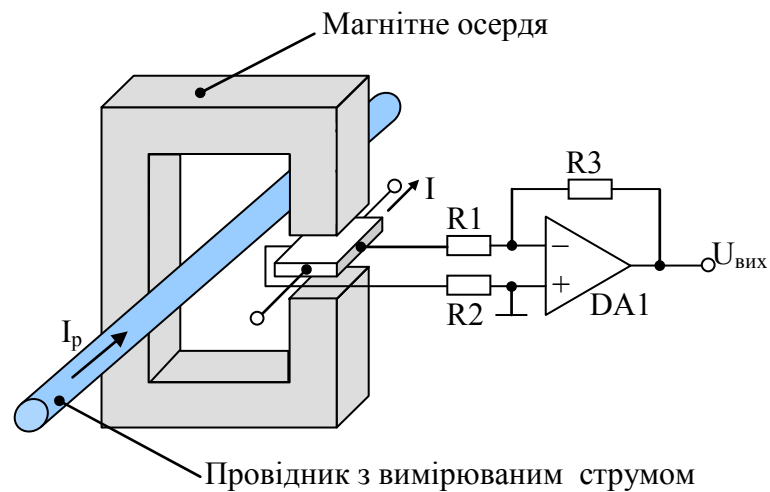


Рис. 3.3. Датчик струму відкритого типу на ефекті Холла

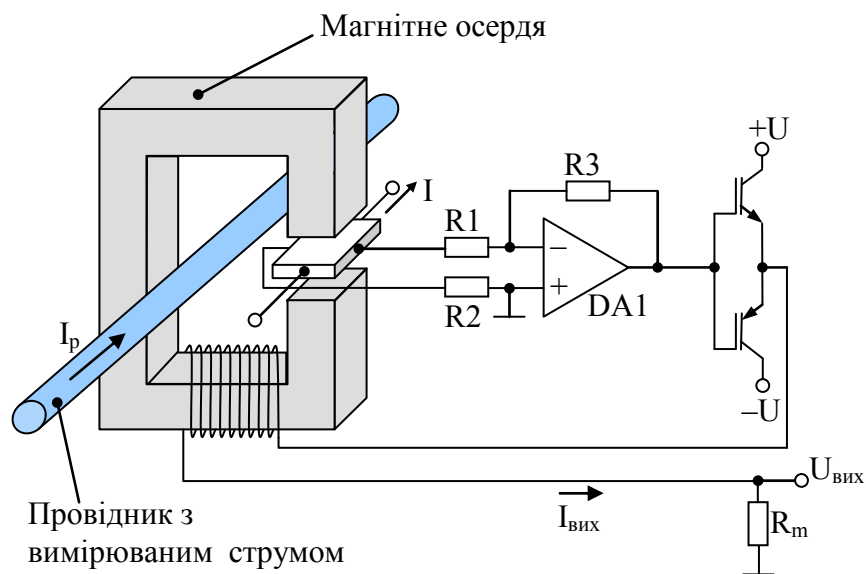


Рис. 3.4. Датчик струму компенсаційного типу

Датчики компенсаційного типу характеризуються більш високою точністю, лінійністю, а також завадо захищеністю, яка досягається за рахунок використання струмового сигналу на виході. Як наслідок, вартість цих датчиків є вищою у порівнянні з датчиками відкритого типу.

Додатковими перевагами датчиків на ефекті Холла є їх широка полоса пропускання, яка типово дозволяє вимірювати струми в діапазоні від нуля і до 100 кГц.



Номінальний вхідний струм  $I_{PN} = 100 \text{ A}$ .

Максимальний вхідний струм  $I_p = \pm 150 \text{ A}$ .

Номінальний вихідний струм  $I_{SN} = 50 \text{ mA}$ .

Напруга живлення  $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ .

Точність  $\pm 0.7\%$ .

Нелінійність  $\leq 0.15\%$ .

Час затримки 1 мкс.

Рис. 3.5. Зовнішній вигляд та основні характеристики датчика LA-100P (LEM)



Номінальний вхідний струм  $I_{PN} = 25 \text{ A}$ .

Максимальний вхідний струм  $I_p = \pm 80 \text{ A}$ .

Вихідна напруга при  $I_p = 0$   $U_{out} = 2.5 \text{ V}$ .

Напруга живлення 5 V.

Точність  $\pm 0.7\%$ .

Нелінійність  $\leq 0.1\%$ .

Час затримки 0.4 мкс.

Рис. 3.6. Зовнішній вигляд та основні характеристики датчика струму LTS-25NP (LEM)

Для вимірювання напруги також використовують датчики, побудовані на ефекті Холла. Для цього первинне коло датчика підключається через додатковий опір до вимірюваної напруги, що призводить до протікання через нього невеликого струму (на рівні декількох десятків міліампер), який є пропорційним вимірюваній напрузі і фактично вимірюється датчиком. На рис. 3.5 - 3.8 показана

но зовнішній вигляд і основні характеристики декількох датчиків струму та напруги. Більш детальна інформація стосовно датчиків струму і напруги на ефекті Холла може бути знайдена в [1].



Номинальний вхідний струм 10 мА  
Максимальний вхідний струм  $\pm 14$  мА  
Номинальний вихідний струм 25 мА  
Напруга живлення  $\pm 12 \dots 15$  В  
Точність  $\pm 0.9\%$   
Нелінійність  $\leq 0.2\%$   
Час затримки 40 мкс.

Рис. 3.8. Зовнішній вигляд та основні характеристики датчика напруги LV-25NP (LEM)

### 3.2 Вимірювання кутової швидкості та положення

Фото-імпульсний датчик швидкості (енкодер) представляє собою пристрій, який містить: вал із закріпленим на ньому диском з рівномірно розташованими по колу отворами; набір світлодіодів та фотоприймачів (оптичних пар), які розміщені по різні сторони диску, як показано на рис. 3.9; електронні схеми для живлення світлодіодів та формування вихідних імпульсів.

При обертанні валу датчика, внаслідок наявності у диску рівномірно розташованих отворів, світло від світлодіодів періодично попадає на фотоприймачі, які формують на виході електричні імпульси, частота яких пропорційна швидкості обертання диску.

Для визначення напрямку обертання (знаку кутової швидкості) використовують дві оптичні пари які формують «пряму» (А) та «зворотну» (В) послідовності імпульсів. Взаємне геометричне розташування цих оптичних пар виконується так, щоб зсув між вихідними імпульсами послідовностей А та В дорівнював чвертї періоду. Для того щоб визначити напрямок руху, аналізується, наприклад, стан сигналу послідовності В при надходженні переднього фронту послідовності А. Припустимо, що вал датчика обертається проти годинникової

стрілки, тобто імпульси на рис. 3.9 умовно «рухаються» вліво. В цьому випадку передній фронт послідовності А з'являється при  $V=0$ . При русі у зворотному напрямку (імпульси «рухаються» вправо) передній фронт послідовності А з'являється при  $V=1$ . Таким чином стан послідовності В при надходженні переднього фронту сигналу А визначає напрямок обертання валу датчика. Аналогічний аналіз можна виконувати по будь-якому з фронтів імпульсів послідовностей А і В.

Додатково, використання двох послідовностей імпульсів дозволяє підвищити розподільчу здатність фото-імпульсних датчиків швидкості в чотири рази. Для цього на основі сигналів А і В формується одна результуюча послідовність АВ, яка отримується за рахунок виділення передніх та задніх фронтів імпульсів сигналів А і В, як показано на рис. 3.10. З метою вимірювання кутового положення чи кутової швидкості виконується підрахунок імпульсів результуючої послідовності АВ.

Третя оптична пара призначена для отримання послідовності імпульсів, яку називають нульовою або z- послідовністю. Для формування імпульсів цієї послідовності в диску датчика роблять окремий отвір (нульова мітка) таким чином, щоб генерувався один імпульс на оберт, див. рис. 3.9. Основним призначенням нульової мітки є знаходження початкового положення робочого органу чи валу двигуна, а також корекція вимірювання кутового положення.

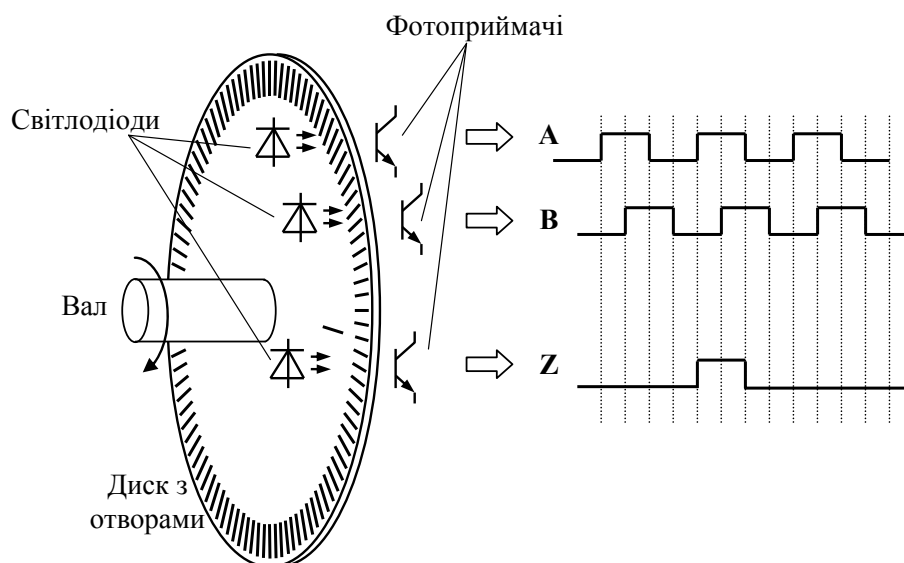


Рис. 3.9. Принцип дії фото-імпульсного датчика швидкості



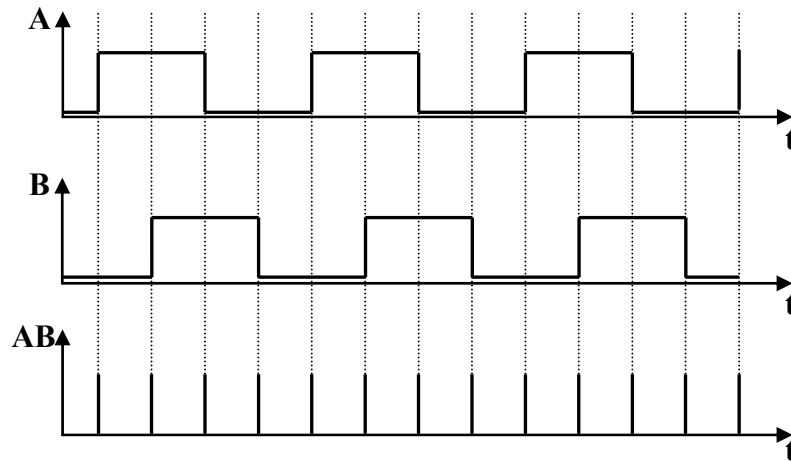


Рис. 3.10. Формування результуючої послідовності імпульсів

Найпростішим способом вимірювання кутової швидкості за допомогою фото-імпульсного датчика є диференціювання кутового положення

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta t$  – малий інтервал часу, протягом якого вал датчика повертається на кут  $\Delta\theta$ .

Іншими словами,  $\Delta t$  – це час, протягом якого виконується підрахунок імпульсів результуючої послідовності АВ для визначення відносного кута повороту валу. Визначимо  $\Delta t = T_{so}$  як такт вимірювання кутової швидкості. Нехай, датчик має розподільчу здатність, яка вказана в його паспорті,  $N$  імп/об. Тоді ціна одного імпульсу результуючої послідовності АВ буде рівною

$$\theta_{ii} = \frac{2\pi}{4N}. \quad (3.2)$$

Виміряна кутова швидкість розраховується як

$$\omega = \frac{n\theta_{ii}}{T_{so}} = \frac{2\pi n}{4NT_{so}}, \quad (3.3)$$

де  $n$  – кількість імпульсів результуючої послідовності АВ, які надійшли від датчика за час  $T_{so}$ .

#### 4. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

Для розрахунку основних елементів перетворювача необхідно мати значення наступних параметрів: напруга та кількість фаз мережі живлення, потужність двигуна, ККД двигуна, номінальний струм двигуна.

Розглянемо розрахунок силової частини перетворювача для двигуна 4A90L4У3 з параметрами, наведеними у таблиці 4.1, який приводить в рух вентилятор.

Таблиця 4.1 - Паспортні дані двигуна 4A90L4У3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 2.2 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.0056 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.80$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.83$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.4$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.051$
Критичне ковзання	$s_k = 0.33$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В},$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\varphi)} = \frac{2.2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.80 \cdot 0.83} = 5.0 \text{ А}.$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В},$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 5 = 7.07 \text{ А}.$$

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу  $k_{ovl}$ , яка, в загальному випадку залежить від конкретного типу механізму і дорівнює орієнтовно  $k_{ovl} = (1.1 \div 1.3)$  для турбомеханізмів,  $k_{ovl} = (1.4 \div 2)$  – для екструдерів, конвеєрів, підйомно-транспортних механізмів,  $k_{ovl} = (2 \div 3)$  – для високо-динамічних застосувань, таких як роботи, приводи подачі та інші.

Прийнявши перевантажувальну здатність для привода вентилятора  $k_{ovl} = 1.2$ , розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача

$$I_{max} = k_{ovl} I_{na} = 1.2 \cdot 7.07 = 8.48 \text{ А.} \quad (4.1)$$

При живленні перетворювача від трифазної мережі живлення  $U_{grid} = 380$  В, напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде приблизно рівною  $U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} \approx 540$  В.

При виборі IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто

$$U_{ce} > 1.5 U_{dcmax} \quad (4.2)$$

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням  $U_{grid} = 380$  В, і 375 В для перетворювачів з однофазним живленням  $U_{grid} = 220$  В.

Таким чином  $U_{ce} = 1.5 \cdot 750 = 1125$  В.

IGBT транзистори, які випускаються сучасною промисловістю, мають стандартний ряд максимальних напруг колектор-емітер: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В [2].

Вибір IGBT може бути здійснений на сайтах виробників [2], [3], [4], [5] за критерієм

$$I_c > I_{\max}, U_{ce\max} > U_{ce},$$

де  $I_c$  та  $U_{ce\max}$  – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

Для побудови силової частини перетворювача зручно використовувати так звані IGBT-модулі, які в одному корпусі містять 6 або 7 транзисторів з антипаралельними діодами та вбудований випрямляч. Такі продукти присутні у асортименті наступних виробників: [2], [3], [4], та інших.

Вибираємо по каталогу [4] IGBT модуль типу FP10R12W1T4 з параметрами  $U_{ce} = 1200$  В,  $I_c = 10$  А.

Ємність випрямляча визначається за формулою

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0}, \quad (4.3)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні  $(0.02 \div 0.05)$ ,  $m$  – число фаз випрямляча,  $f$  – частота напруги мережі живлення,  $R_0$  – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Для визначення  $R_0$  розрахуємо значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{1.2 \cdot 2200}{540 \cdot 0.8 \cdot 0.96} = 6.37 \text{ А}, \quad (4.4)$$

де  $\eta_{inv} = (0.95 \div 0.97)$  – коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Тоді еквівалентний опір навантаження розраховується як

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{6.37} = 85 \text{ Ом}. \quad (4.5)$$

У відповідності з (4.3) розрахункове значення ємності фільтра для  $k_p = 0.04$  буде дорівнювати

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 85} = 312 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо по каталогу [6] конденсатори типу В43510А3687М000 ємністю  $C_c = 680$  мкФ та максимальною напругою 385 В. Потрібна ємність та робоча напруга фільтра досягається послідовним включенням двох конденсаторів, як показано на Рис. 4.1. При цьому сумарна ємність буде  $C_{12} = \frac{C_c}{2} = \frac{680}{2} = 340$  мкФ.

Вибір датчиків струму здійснюють за максимальний струмом, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим від максимально допустимого струму в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача для вибору використовують значення максимального струму (4.1).

Якщо для керування координатами двигуна використовуються методи, які не потребують організації зворотних зв'язків за струмом, а вимірювання струму здійснюється лише для захисту системи, то для здешевлення перетворювача датчики на виході інвертора можна не встановлювати і обмежитися лише датчиком струму в ланці постійного струму.

Вибір датчика струму може бути здійснений на сайті [1]. Оскільки в розглянутому прикладі достатньо обмежитися датчиком струму в ланці постійного струму, то по розрахованому значенню  $I_{dc}$  вибираємо датчик типу НО 8-NP, номінальний струм якого складає 8А, діапазон вимірювання 20 А.

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25NP [1], схема підключення якого показана на Рис. 4.1.

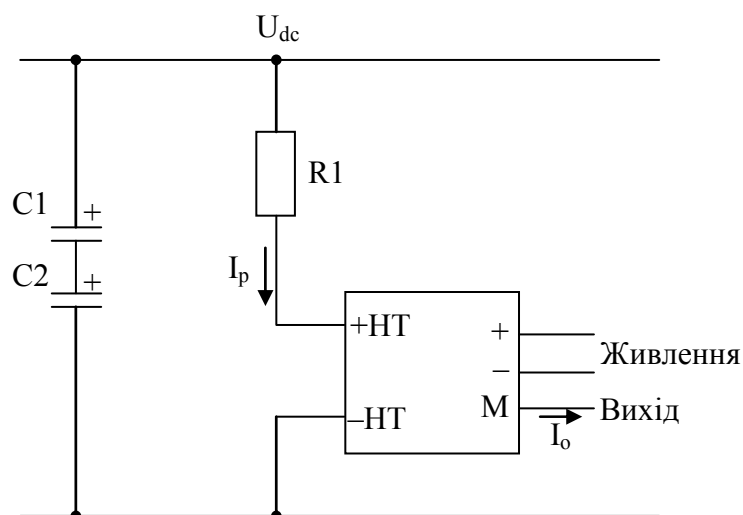


Рис. 4.1. Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола  $I_{p\max} = 14$  мА. Тому значення опору резистора R1 дорівнює:

$$R1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом.}$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо  $R1=56$  кОм.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.lem.com](http://www.lem.com)
2. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.pwr.com](http://www.pwr.com)
3. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
4. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
5. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.irf.com](http://www.irf.com)
6. [Електронний ресурс]: Режим доступу [www.epcos.com](http://www.epcos.com)