

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

М. І. Шпіка

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*(для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання
напряму підготовки 0922 (6.050702) – «Електромеханіка»
спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)*

Харків – ХНАМГ – 2012

Шпіка М. І. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів 3 і 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 0922 (6.050702) – «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») / М. І. Шпіка; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 71 с.

Автор: М. І. Шпіка

Рецензент: к.т.н., доц. В. П. Андрійченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,
протокол № 3 від 19 жовтня 2010 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Основні принципи автоматичного керування.....	6
2. Класифікація автоматичних систем.....	12
3. Функціональна схема автоматичної системи.....	15
4. Типові автоматичні системи	17
4.1 Автоматичні системи стабілізації.....	17
4.2 Автоматичні програмні системи.....	20
5. Способи опису роботи автоматичної системи.....	22
6. Властивості автоматичних систем.....	24
6.1 Оцінка статичних властивостей автоматичної системи.....	24
6.2 Оцінка динамічних властивостей автоматичної системи.....	27
7. Типові вузли автоматичних систем.....	30
7.1 Класифікація типових вузлів автоматичних систем.....	30
7.2 Аналіз типових вузлів автоматичних систем.....	32
8. Якість перехідних процесів у автоматичних системах.....	38
8.1 Показники якості перехідних процесів.....	38
8.2 Оцінки якості перехідних процесів.....	38
8.3 Обчислення похибок автоматичної системи.....	41
8.4 Похибки від органів керування.....	42
9. Корекція автоматичних систем.....	44
10. Багаторівневі системи керування.....	47
10.1 Структура багаторівневої системи керування.....	47
10.2 Складові багаторівневої системи керування.....	49
11. Мікропроцесорні системи керування.....	54
11.1 Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування.....	54
11.2 Структура мікропроцесорної системи.....	59
11.3 Елементи мікропроцесорної системи.....	60
12. Цифрові канали зв'язку.....	66
12.1 Характеристики цифрових каналів зв'язку.....	66
12.2 Протоколи обміну.....	68
Список джерел.....	70

ВСТУП

Останні десятиліття ознаменувалися значними успіхами в галузі силовій електроніки та мікропроцесорної техніки. Було освоєно промислове виробництво біполярних транзисторів (IGBT) з ізолюваним затвором та силових модулів на їхній основі, а також силових інтелектуальних модулів (IPM) із вбудованими засобами захисту ключів та інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування.

Зростання ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці й перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів із вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв, зробили необоротною тенденцію масової заміни аналогових систем керування електроприводами на системи прямого цифрового керування.

В економічно розвинених країнах міський електротранспорт та підприємства житлово-комунального господарства (ліфтові служби, водопостачання тощо) практично повністю перейшли на частотно-регульований асинхронний електропривод. Це викликано прагненням знизити питомі енерговитрати й експлуатаційні витрати, підвищити надійність електроприводу, збільшити термін служби електроустаткування й поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу.

Використання мікропроцесорної системи керування (МПСК) розширяє функціональні можливості електроприводу, поліпшує його статичні й динамічні характеристики за рахунок реалізації оптимальних законів і алгоритмів широтно-імпульсного керування інвертором.

МПСК забезпечує частотний пуск, роботу й гальмування електроприводу за заданим алгоритмом.

Задані характеристики електроприводу підтримуються мікропроцесорною системою керування протягом усього терміну роботи, а за необхідності можуть корегуватися шляхом удосконалення алгоритмів керування на програмному рівні. Це дозволяє, не змінюючи структури системи керування, покращувати її ефективність, а в кінцевому рахунку – збільшити термін роботи електрообладнання та знизити експлуатаційні затрати. Крім того, використання мікропроцесорної системи керування забезпечує ефективну систему діагностики електроприводу. З'являється можливість записувати процеси, що протікають у силовій частині електроприводу й системі керування, з подальшим відтворенням їх на екрані монітора персонального комп'ютера.

Курс дисципліни "Системи керування електроприводами" призначений для освоєння студентами фізичних явищ в автоматичних системах керування, їх способів опису та властивостей, аналізу типових вузлів та показників якості, аналітичного опису елементів систем, вивчення сучасних систем керування і їх складових.

При вивченні дисципліни «Системи керування електроприводами» передбачається, що студент має відповідну математичну підготовку в галузі диференціального й інтегрального числення, тригонометричних функцій, а також знайомий із курсами «Теорія автоматичного керування» та «Теорія електроприводу».

1. Основні принципи автоматичного керування

Одна з головних задач при побудові автоматичних систем керування полягає в тому, щоб вирішити яким чином за допомогою простих технічних засобів отримати і передати необхідний об'єм інформації для досягнення мети керування.

Незважаючи на різноманітність технічних рішень, побудова автоматичних систем ґрунтується на загальних принципах керування, основні з яких:

- принцип керування по відхиленню;
- принцип керування по збуренню;
- принцип комбінованого керування;
- принцип адаптації.

Принцип автоматичного керування визначає, як і на основі якої інформації формувати дію керування в системі. Однією з основних ознак, що характеризують принцип керування, є робоча інформація, а отже і конфігурація ланцюгів передачі її в системі. Вибір принципу побудови автоматичної системи залежить від її призначення, характеру зміни завдання і збурюючих дій, можливостей отримання необхідної робочої інформації, стабільності параметрів керованого об'єкту та елементів пристрою керування і т. п.

Якщо в автоматичній системі сигнал керування формується на основі інформації про відхилення керованої величини від необхідного значення, то така система побудована на основі принципу керування по відхиленню. Для реалізації цього принципу в системі необхідно здійснювати порівняння дійсного значення керованої величини з необхідним (заданим) значенням і керувати об'єктом залежно від результатів цього порівняння.

Першими автоматичними системами, в яких реалізували принцип керування по відхиленню, були автоматичний регулятор рівня води в казані парової машини, винайдений І. І. Ползуновим в 1765 р., і відцентровий регулятор швидкості обертання валу парової машини Уатта в 1784 р.

Застосовуючи принцип керування по відхиленню, можна побудувати автоматичні системи зі зворотним зв'язком (рис. 1.1).

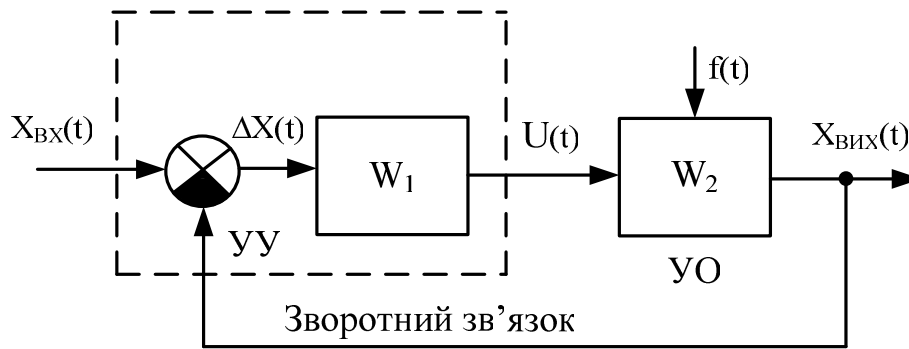


Рис. 1.1 – Структурна схема автоматичної системи зі зворотним зв'язком

Зворотний зв'язок — це такий зв'язок, по якому інформація про стан керованого об'єкта передається з виходу системи на вхід пристрою, що керує. Зворотний зв'язок називають негативним, якщо по ньому передається на вхід порівнюючого елемента вихідний сигнал з протилежним знаком, тож відхилення дорівнює:

$$\Delta x(t) = x_{\text{вх}}(t) - x_{\text{вих}}(t). \quad (1.1)$$

У автоматичній системі зі зворотним зв'язком можна реалізовувати різні закони керування: стабілізацію, програмну зміну, стеження.

Принцип керування по відхиленню є універсальним і ефективним, оскільки він дозволяє керувати нестійкими об'єктами, а також здійснювати необхідний закон зміни керованої величини з допустимо малим відхиленням (похибкою).

Принцип керування за збуренням, або принцип компенсації збурень, полягає в тому, що керуюча дія в системі виробляється в залежності від результатів вимірювання збурення, яке діє на об'єкт. Системи, побудовані за цим принципом, не мають зворотного зв'язку. Системи без зворотного зв'язку поділяють на дві групи: системи компенсації та системи програмного керування.

У системі компенсації (рис. 1.2) на керований об'єкт (УО) впливає координатне збурення $f_k(t)$, яке змінює регульовану величину $x_{вих}(t)$.

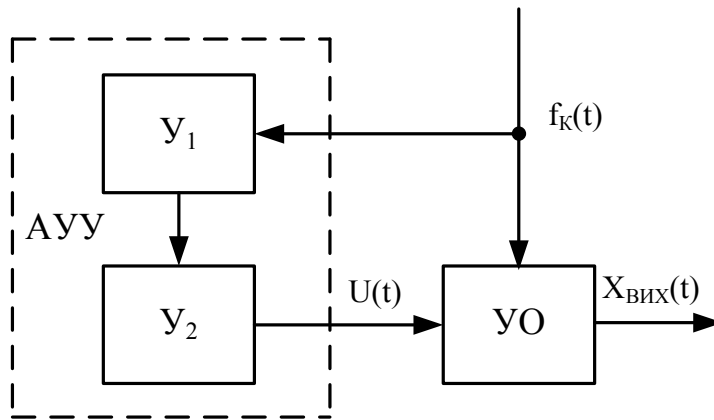


Рис. 1.2 – Структурна схема автоматичної системи компенсації

Це збурення вимірюється спеціальним пристроєм Y_1 . Отриманий сигнал підсилюється і перетворюється, якщо це необхідно, в іншій частині автоматичного керуючого пристрою (АУУ) – Y_2 . Отже, керуючий сигнал є функцією збурюючої дії.

Величина і знак керуючого сигналу мають бути такими, щоб повністю або значною мірою компенсувати дію збурення на об'єкт.

Таким чином, автоматичними системами без зворотного зв'язку називаються системи, в яких керуюча дія формується в функції завдання і збурюючої дії одночасно:

$$u = F(x_{вих}, f_k). \quad (1.2)$$

Принцип керування за збуренням застосовується там, де необхідно зменшити похибки автоматичних систем, викликані збурюючою дією. Його основна перевага – висока швидкодія ланцюгів компенсації, оскільки система реагує безпосередньо на причину, а не на наслідок. Однак цей принцип має недоліки. Основний із них – вибірковість: не завжди можливо виміряти й

урахувати всі збурення. Зазвичай враховується дія лише одного або декількох найбільш істотних збурень, які вимірюються керуючим пристроєм.

Системи програмного керування (рис. 1.3) також поширені в техніці.

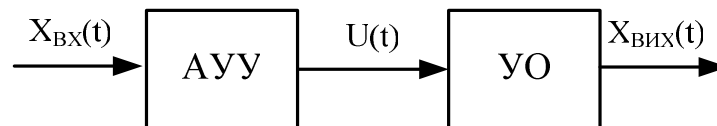


Рис. 1.3 – Структурна схема автоматичної системи програмного керування

До них належать, наприклад, верстати з програмним керуванням. У цих системах програма зберігається в запам'ятовувальних пристроях і в цифровому вигляді надходить на виконавчі пристрої, забезпечуючи певний закон зміни керованої величини. Отже, розімкненими системами програмного керування називаються такі системи, в яких керуюча дія виробляється в функції програми. При цьому в більшості випадків виникає необхідність у застосуванні принципу компенсації збурень.

Сучасні автоматичні системи високої точності зазвичай будуються на основі принципу комбінованого керування, що поєднує в собі принципи керування за відхиленням і за збуренням. При цьому в автоматичних системах комбінованого керування поруч із замкнутими контурами, утвореними негативними зворотними зв'язками, є ланцюги компенсації основного збурюючого впливу (рис. 1.4) або ланцюги компенсації похибок від задаючого впливу x_{BX} (рис.1.5).

Принцип адаптації або пристосування розглянемо на прикладі автоматичної системи, яка складається з основної системи і додаткових пристроїв (рис. 1.6).

Основна система побудована відповідно до принципу керування за відхиленням і включає керований об'єкт (УО) і автоматичний керуючий пристрій (ЛУУ).

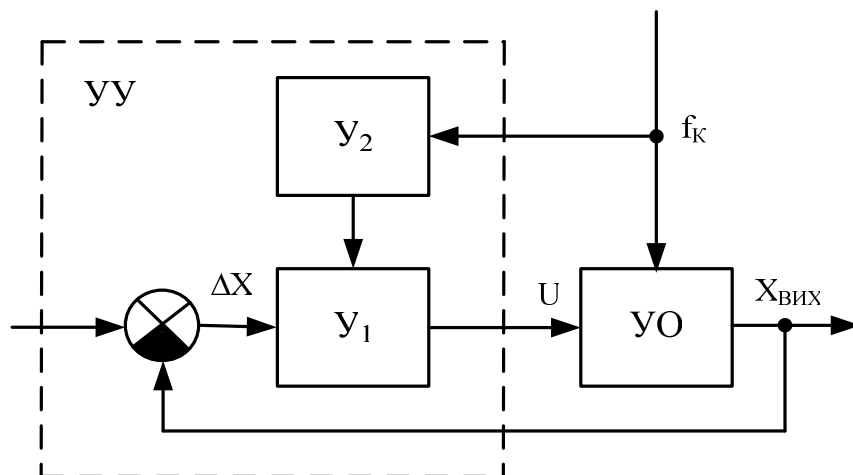


Рис. 1.4 – Структурна схема автоматичної системи комбінованого керування з ланцюгом компенсації основного збурюючого впливу

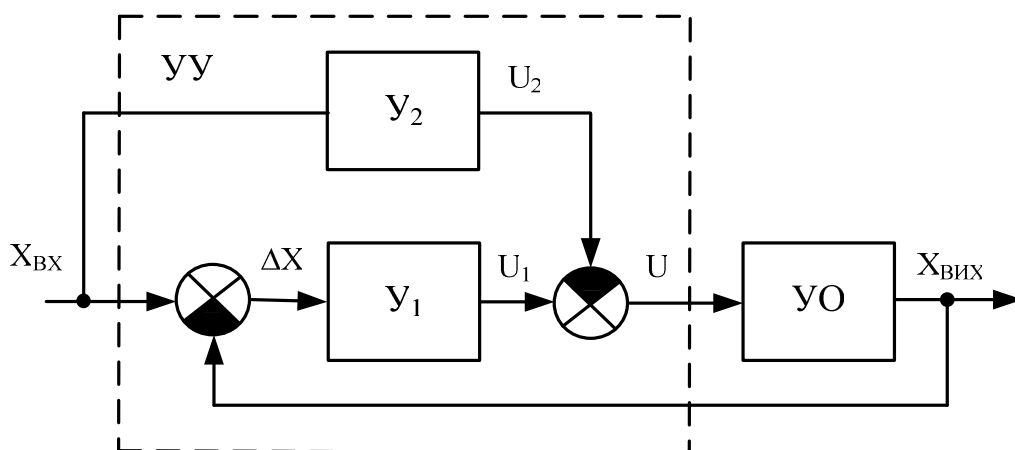


Рис. 1.5 – Структурна схема автоматичної системи комбінованого керування з ланцюгом компенсації похибок від задаючого впливу

На її вхід разом із корисним сигналом $x_{вх}(t)$ надходить перешкода $n(t)$. Спектральні щільності цих функцій можуть змінюватися в процесі роботи системи. У таких складних умовах система має бути здатна до налаштування свого основного керуючого пристрою (ЛУУ).

Для досягнення необхідних показників якості процесу управління до основної системи підключені наступні додаткові пристрої, що утворюють контур самонастроювання:

- пристрій аналізу вхідного сигналу (УАС);
- пристрій аналізу об'єкта (УАО);
- обчислювальний пристрій (ВП);
- виконавчий пристрій контуру самостійної настройки (ІУ).

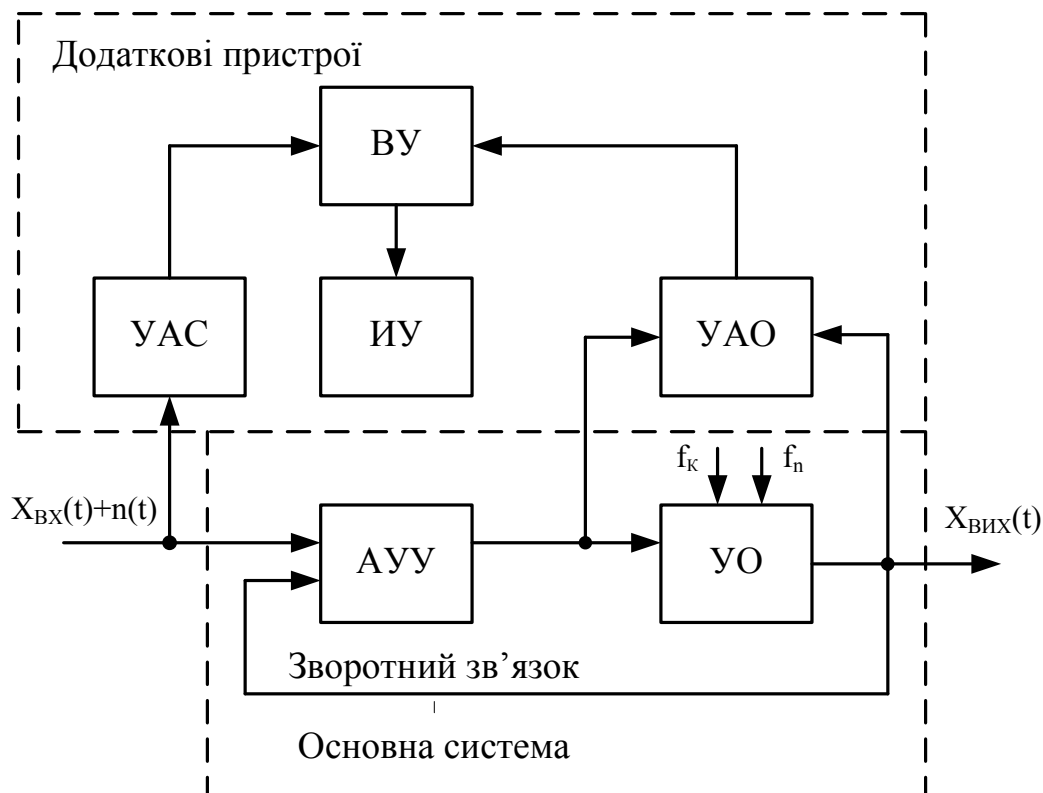


Рис. 1.6 – Структурна схема автоматичної адаптивної системи

Таким чином, роботу контуру самостійної настройки можна представити як процес автоматичної настройки керуючого пристрою основної системи за сукупністю поточної інформації при змінних умовах роботи для досягнення поставленої мети керування.

Контрольні запитання

1. Які основні принципи автоматичного керування?
2. Що визначає принцип автоматичного керування?
3. Що таке зворотний зв'язок?
4. Який знак має зворотний зв'язок?
5. Які системи називаються системами програмного керування?
6. Де застосовується принцип керування за збуренням?
7. Що таке принцип адаптації?
8. Що таке принцип комбінованого керування?
9. Що таке принцип керування за відхиленням?

2. Класифікація автоматичних систем

Автоматичні системи можна класифікувати за багатьма ознаками:

- за призначенням, наприклад, системи керування електричним транспортом, ліфтами, верстатами, літальними апаратами і т. п.;
- за характером керованих величин, наприклад, системи регулювання напруги частоти, швидкості, прискорення, температури;
- за видом використовуваної для керування енергії, наприклад, електричні, електронні, гідравлічні, пневматичні і т.п.

За характером зміни задаючої дії автоматичні системи підрозділяють на три типи:

- системи стабілізації;
- програмні системи;
- системи стеження.

Система стабілізації – це автоматична система, призначена для підтримки із заданою точністю постійного значення керованої величини.

У цій системі необхідне значення керованої величини постійне:

$$x_{\text{вх}} = \text{const}, \quad (2.1)$$

а похибка (розузгодження) в сталому режимі має не перевершувати допустимої величини:

$$\Delta x_{\text{уст}} = x_{\text{вх}} - x_{\text{вих}} \leq x_{\text{доп}}. \quad (2.2)$$

Вплив збурюючих дій у системі стабілізації різко знижується або повністю усувається. Прикладами систем стабілізації є системи стабілізації напруги, частоти, швидкості, моменту т. ін.

Програмна система – це автоматична система, завданням якої є зміна керованої величини по складеній програмі, яка визначається задаючою дією:

$$x_{\text{вх}}(t) = F_{\text{п}}(t) \quad (2.3)$$

$$\Delta x_{\text{уст}} = x_{\text{вх}} - x_{\text{вих}} \leq x_{\text{доп}}, \quad (2.4)$$

де $F_{\text{п}}(t)$ – програма, заздалегідь відома функція часу.

Приклади програмних автоматичних систем: системи програмного керування верстатами т. ін.

Система стеження – це автоматична система, завданням якої є зміна керованої величини відповідно до невідомої функції від часу, яка визначається задаючою дією:

$$x_{\text{вх}}(t) = F(t) \quad (2.5)$$

$$\Delta x_{\text{уст}} = x_{\text{вх}} - x_{\text{вих}} \leq x_{\text{доп}}, \quad (2.6)$$

де $F(t)$ – невідома функція часу.

У системі стеження керована величина має стежити за задаючою дією, що звичайно змінюється по невідомій функції часу. До таких систем належать

приводи стеження різних об'єктів, системи автоматичного підстроювання частоти генераторів т. ін.

За величиною сталої похибки автоматичні системи підрозділяють на статичні і астатичні.

Якщо при постійній корисній або шкідливій дії на систему встановлюється відмінне від нуля значення похибки, то таку систему по відношенню до даної дії називають статичною.

Якщо при постійній дії встановлюється рівне нулю значення похибки, то таку систему по відношенню до даної дії називають астатичною.

За способом передачі й перетворення сигналів автоматичні системи підрозділяються на безперервні й дискретні.

У безперервних системах передається і перетворюється кожне миттєве значення сигналу, тобто сигнал є безперервною функцією часу.

У дискретних системах передається і перетворюється сигнал, квантований за часом, по рівню або одночасно за часом і по рівню.

По виду диференціальних рівнянь, якими описуються автоматичні системи, їх можна підрозділити на лінійні й нелінійні.

Автоматичні системи, динаміка яких описується нелінійними рівняннями, називаються нелінійними системами. Більшість автоматичних систем є нелінійними. Математичне поняття «нелінійність» має різне значення залежно від протікаючих фізичних явищ: насичення, нечутливості, гістерезису і т. п. Якщо нелінійності сильно впливають на динамічні властивості системи, то їх вважають нелінійними.

Якщо автоматичні системи можна описати лінійними рівняннями, то їх називають лінійними.

Лінійні автоматичні системи діляться на стаціонарні та нестаціонарні.

Стаціонарні лінійні автоматичні системи мають незмінні в часі параметри і описуються лінійними рівняннями з постійними коефіцієнтами. Нестационарні лінійні автоматичні системи мають змінні в часі параметри й описуються лінійними рівняннями зі змінними коефіцієнтами.

Контрольні запитання

1. Як підрозділяються автоматичні системи по характеру зміни задаючої дії?
2. Які системи називаються системами стабілізації?
3. Які системи називаються програмними системами?
4. Які системи називаються системами стеження?
5. Як підрозділяються автоматичні системи по величині сталої похибки?
6. Які системи називаються статичними?
7. Які системи називаються астатичними?
8. Які системи називаються стаціонарними?
9. Які системи називаються нестаціонарними?
10. Які системи називаються лінійними?
11. Які системи називаються нелінійними?

3. Функціональна схема автоматичної системи

Серед різних автоматичних систем найбільшого поширення набули системи, в яких реалізований принцип керування за відхилення. Для пояснення принципу дії автоматичних систем застосовують функціональні схеми. Функціональна схема складається з функціональних блоків, які є конструктивно відособленими елементами автоматичних систем, що виконують певні функції. Функціональні блоки на схемі позначають прямокутниками, усередині яких надписують їх найменування відповідно до виконуваних функцій. Зв'язки між функціональними блоками позначаються лініями зі стрілками, які указують напрям дій.

Розглянемо функціональну схему автоматичної системи, приведену на рис. 3.1, яка складається з об'єкта регулювання (ОР), регулятора та пристрою завдання (ЗП).

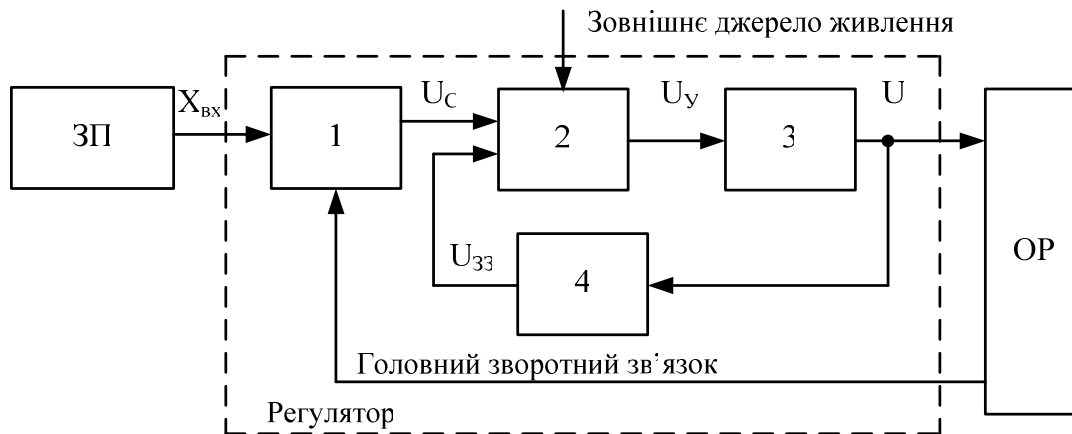


Рис. 3.1 – Функціональна схема автоматичної системи

У цій системі функціонально необхідними елементами, за допомогою яких реалізується принцип керування за відхиленням, є об'єкт регулювання ОР, вимірювальний (1), підсилювальний (2) і виконавчий (4) пристрої, пристрій завдання та головний зворотній зв'язок.

Вимірювальний пристрій виробляє сигнал U_c , пропорційний відхиленню Δx регульованої величини $X_{вих}$ від необхідного значення $X_{вх}$:

$$U_c = k_c (x_{вх} - x_{вих}) = k_c \Delta x, \quad (3.1)$$

де k_c — коефіцієнт передачі вимірювального пристрою.

Необхідне значення регульованої величини виробляється в пристрої завдання ЗП. Пристрій ЗП може входити до складу регулятора і бути частиною вимірювального пристрою, а може бути розташований на значній відстані від автоматичної системи і пов'язаний із нею дистанційно. У підсилювальному пристрої сигнал похибки збільшується до величини U_y , яка достатня для керування виконавчим пристроєм. Посилення сигналу похибки відбувається за рахунок енергії зовнішнього джерела. У простих системах, де сигнал похибки має достатню потужність, підсилювальний пристрій може бути не потрібний. Однак такі системи, які називаються системами прямого керування, мають обмежене застосування через недостатню точність.

Виконавчий пристрій виробляє сигнал U , який через регулюючий орган прикладається до об'єкта регулювання, щоби звести до нуля неузгодження.

Для поліпшення динамічних властивостей системи, окрім розглянутих функціонально необхідних елементів, вводяться пристрої для корегування, які залежно від місця включення бувають послідовними і паралельними. Послідовний пристрій для корегування включають до ланцюга сигналу похибки між окремими каскадами підсилювача, а паралельний (4) виконується у вигляді місцевих зворотних зв'язків, якими охоплюються найбільш інерційні елементи. В одній автоматичній системі може бути або послідовний, або паралельний пристрій для корегування, або обидва одночасно.

Контрольні запитання

1. Для чого призначені функціональні схеми?
2. Що таке вимірювальний пристрій?
3. Для чого призначений підсилювальний пристрій?
4. Для чого призначений виконавчий пристрій?
5. Для чого призначений задаючий пристрій?
6. Що таке корегуючий пристрій?
7. Для чого призначений головний зворотній зв'язок?

4. Типові автоматичні системи

4.1 Автоматичні системи стабілізації

Системи стабілізації з необхідною точністю підтримують постійне значення регульованої величини. У техніці застосовують багато різних систем стабілізації, наприклад системи стабілізації швидкості обертання електродвигунів різного типу, напруги генераторів, струму, моменту, потужності електродвигунів і т. п.

Розглянемо систему стабілізації швидкості обертання електродвигуна, яка побудована на принципі керування за відхиленням (рис. 4.1).

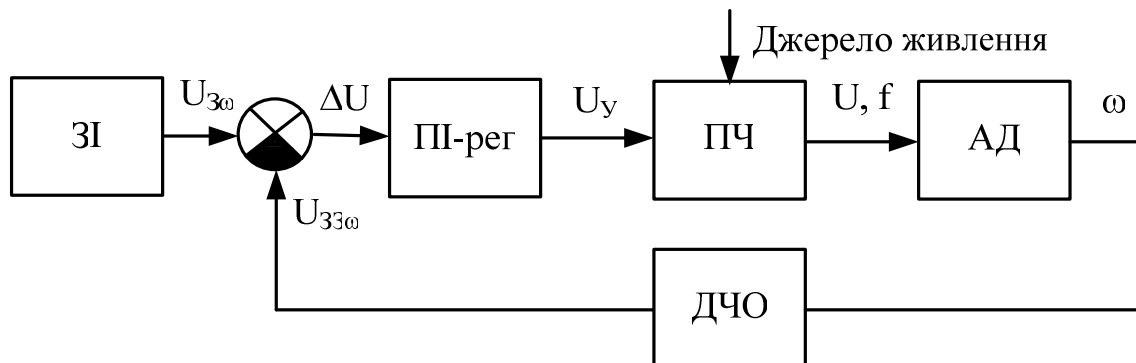


Рис. 4.1 – Система стабілізації швидкості обертання електродвигуна

Регульована величина – кутова швидкість обертання ω ротора електродвигуна АД – вимірюється за допомогою датчика частоти обертів ДЧО, вихідний сигнал $U_{33\omega}$ якого пропорційний ω . Величина $U_{33\omega}$ порівнюється із напругою $U_{3\omega}$, що формується задатчиком інтенсивності ЗІ. Різниця напруг $\Delta U = U_{3\omega} - U_{33\omega}$ поступає на вхід ПІ-регулятора. Вихідний сигнал із ПІ-регулятора подається на перетворювач частоти ПЧ, який, змінюючи напругу і частоту на виході, діє на об'єкт керування – асинхронний електродвигун АД таким чином, щоб значення ω відповідало завданню.

У даній системі регульована величина порівнюється із заданим значенням, і відхилення, що виходить при цьому, використовується для керування електродвигуном, тобто застосовується принцип керування за відхиленням.

Для статичної характеристики системи стабілізації можна записати:

$$\omega = \omega_0 - \beta \cdot M, \quad (4.1)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість;

M – момент на валу АД,

β – коефіцієнт жорсткості характеристики.

Із формули (4.1) видно, що оскільки β не дорівнює нулю, то кутова швидкість електродвигуна ω змінюється зі зміною моменту навантаження M . Враховуючи той факт, що використовується АД із жорсткою характеристикою, відхилення ω буде незначним на величину ковзання.

При використанні такої системи керування в електроприводі постійного струму з двигуном незалежного збудження ДПС НЗ, відхилення керованої величини буде більшим (рис. 4.2).

На рис. 4.2 статична характеристика 1 при моменті M_1 , а статична характеристика 2 – при моменті M_2 , де $M_1 \leq M_2$.

Якщо застосовується принцип керування за збуренням, то статичні характеристики системи стабілізації з ДПС НЗ будуть мати вигляд, приведений на рис. 4.3.

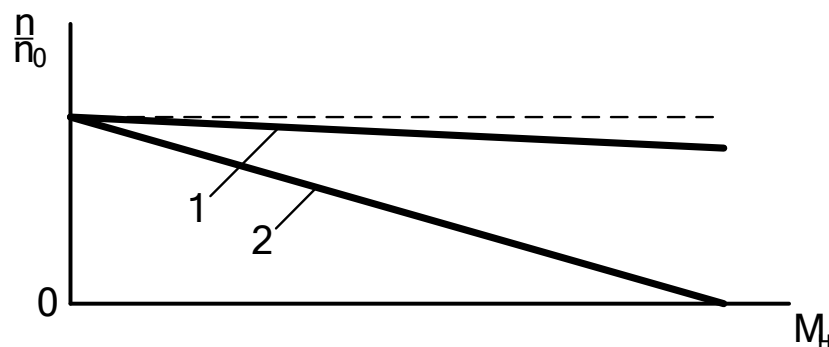


Рис. 4.2 – Статичні характеристики системи стабілізації з ДПС НЗ

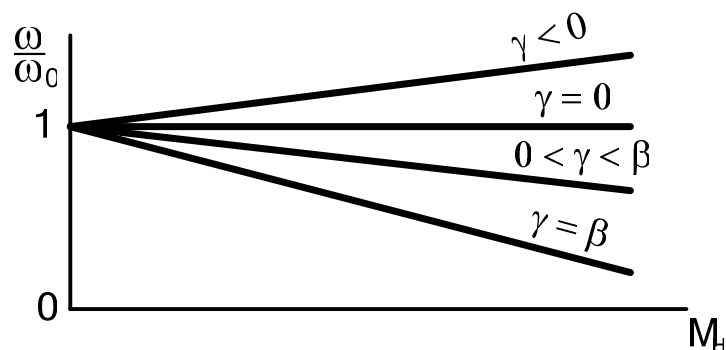


Рис. 4.3 – Статичні характеристики системи стабілізації з ДПС НЗ на основі принципу керування за збуренням

Якщо застосовується астатична система стабілізації швидкості обертання електродвигуна, то статичні характеристики такої системи з ДПС НЗ матимуть вигляд, наведений на рис. 4.4.

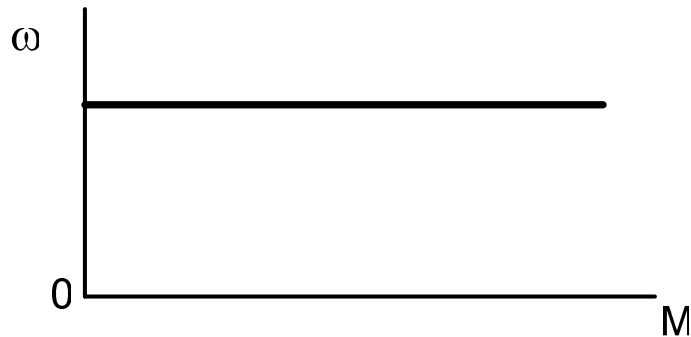


Рис. 4.4 – Статична характеристика системи стабілізації з ДПС НЗ астатичної системи стабілізації швидкості

4.2 Автоматичні програмні системи

Системи програмного керування відрізняються від систем стабілізації тим, що в них задане значення регульованої величини не залишається постійним, а змінюється за визначеною програмою. Програмні системи застосовуються для керування рухом ліфтів і прокатних станів, для регулювання температури в печах та керування копірувально-фрезерними станками та ін.

Розглянемо роботу системи програмного керування на основі структурної схеми, наведеної на рис. 4.5.

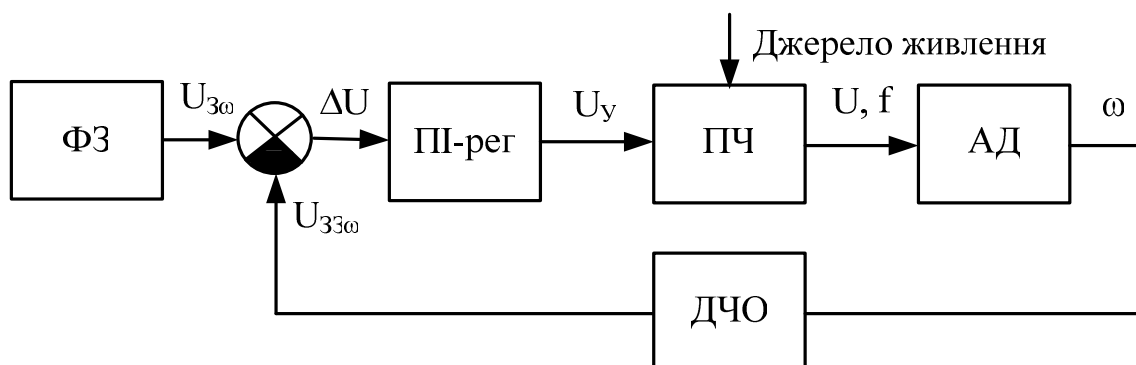


Рис. 4.5 – Структурна схема системи програмного керування

Формувач завдання ФЗ по заданій програмі формує завдання $U_{з\omega}$ у функції часу. Регульована величина – кутова швидкість обертання ω ротора електродвигуна АД – вимірюється за допомогою датчика частоти обертів ДЧО, вихідний сигнал $U_{з\omega}$ якого пропорційний ω . Величина $U_{з\omega}$ порівнюється із напругою U_{ω} , і різниця напруг $\Delta U = U_{\omega} - U_{з\omega}$ поступає на вхід ПІ-регулятора. Вихідний сигнал із ПІ-регулятора U_y подається на перетворювач частоти ПЧ, який, змінюючи напругу і частоту на виході, діє на об'єкт керування – асинхронний електродвигун АД таким чином, щоби значення ω відповідало завданню.

Характеристики, що формуються системою програмного керування, приведені на рис. 4.6, 4.7.

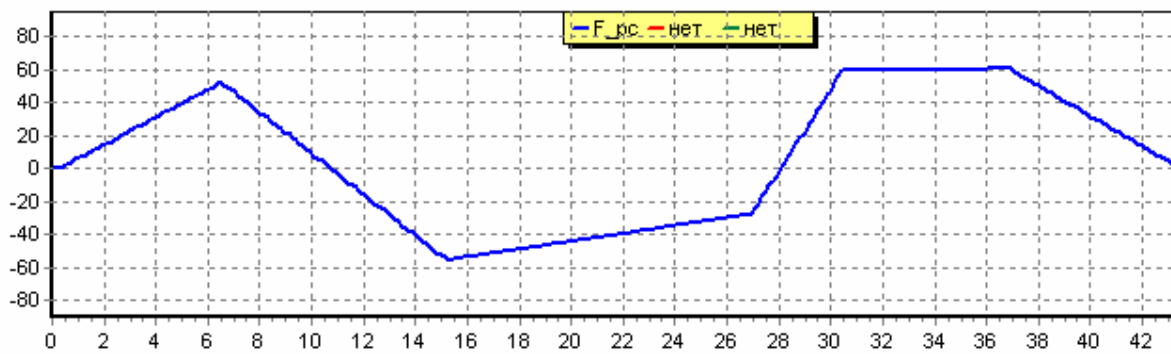


Рис. 4.6 – Характеристика завдання, що формується системою програмного керування

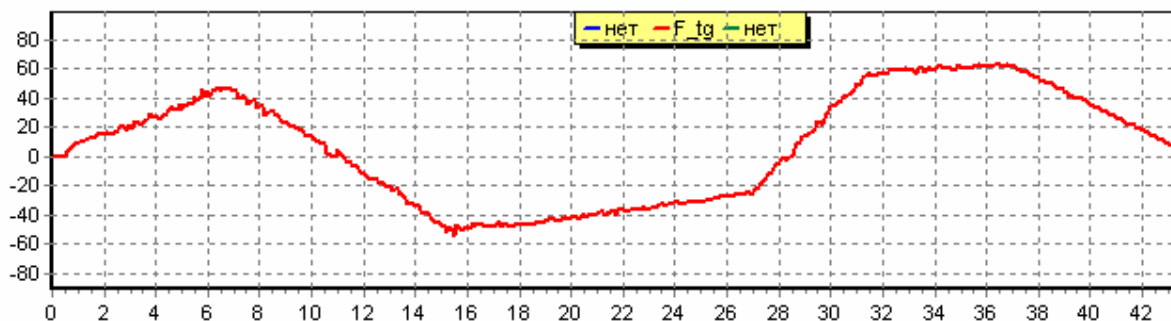


Рис. 4.7 – Вихідна характеристика, що формується системою програмного керування на основі завдання

Контрольні запитання

1. Де використовуються автоматичні програмні системи?
2. Які типові автоматичні системи ви знаєте?
3. Які автоматичні системи стабілізації ви знаєте?
4. Який вид мають статичні характеристики системи стабілізації з ДПС НЗ на основі принципу за відхиленням?
5. Який вигляд мають статичні характеристики системи стабілізації з ДПС НЗ на основі принципу керування за збуренням?
6. Який вигляд мають статичні характеристики астатичної системи стабілізації швидкості?
7. Які характеристики формують автоматичні програмні системи?

5. Способи опису роботи автоматичної системи

Описати роботу автоматичної системи можна словесно. Такий опис необхідний при вирішенні як задачі аналізу, так і синтезу автоматичних систем, оскільки пояснює принцип дії конкретної системи.

Але словесний опис не може повною мірою характеризувати систему, оскільки не дає кількісної оцінки якості її роботи. Крім того, існує багато автоматичних систем, різних як за призначенням, так і за принципом дії, і опис кожної з них не дозволяє робити узагальнення й порівнювати різні системи між собою. Тому необхідно знайти інші способи опису роботи автоматичних систем і ввести характеристики, які дозволяють оцінювати й порівнювати різні за призначенням і принципами дії системи.

Яким же вимогам мають задовольняти характеристики і способи опису автоматичних систем? Вони мають:

- відображати специфіку систем (як систем автоматичного керування);
- застосовуватись до систем різного призначення і з різними принципами дії;

– бути достатньо точними й одночасно дозволяти порівняно просто застосовувати їх на практиці.

Розглянемо ці вимоги докладніше.

Специфіка автоматичних систем полягає в тому, що вони виконують стабілізацію або керування. У першому випадку система підтримує керовану величину на заданому рівні, а в другому — із заданою точністю змінює керовану величину за визначеним або за випадковим, але бажаним для нас законом.

Зміна керованої величини може відбуватися під дією небажаних збурень або сигналів завдання, що спеціально подаються на систему.

За сталий можна прийняти такий режим, при якому помилка системи, тобто різниця між необхідним і фактичним значеннями керованої величини, постійна в часі.

Говорити про сталий режим можна в тому випадку, якщо зовнішня дія змінюється за сталим законом, наприклад лінійно зростає. Зокрема вона може бути постійною. Саме з цієї причини сталий режим часто називають незбуреним рухом системи.

Якщо ж одна або декілька зовнішніх дій почнуть змінюватися за іншим законом, то в системі виникне збурений рух, який характеризується відхиленням координат системи і їх похідних від сталих значень, властивих незбуреному руху. В результаті збуреного руху система або повернеться до колишнього, або перейде до нового сталого режиму. Із цієї причини збурений рух у теорії автоматичного керування називається перехідним процесом.

Збурений рух стосовно автоматичних систем характеризує процес керування або процес стабілізації залежно від типу системи. Перехідний процес є окремим випадком процесу керування, оскільки останній не обов'язково закінчується сталим режимом. Це має місце у тому випадку, коли зовнішнє збурення безперервно змінюється в часі за різними законами.

Роботу будь-якої автоматичної системи в сталому і перехідному режимах можна описати, використавши диференціальні рівняння, які застосовані для опису багатьох явищ природи, зокрема, процесів перетворення і передачі маси або енергії. А саме ці процеси і відбуваються в кожній автоматичній системі незалежно від її принципу дії, конструктивного оформлення і призначення. Вирішивши диференціальне рівняння системи, можна визначити значення керованої величини у будь-який момент часу при вибраному законі зміни збурюючих дій і провести кількісну оцінку процесу керування.

Контрольні запитання

1. Яким чином можна описати роботу автоматичної системи?
2. При вирішенні яких задач необхідний словесний опис?
3. Чи може словесний опис повною мірою характеризувати систему?
4. Яким вимогам мають задовольняти способи опису автоматичних систем?
5. Який режим можна прийняти як сталий?
6. Який рух у теорії автоматичного керування називається перехідним процесом?

6. Властивості автоматичних систем

6.1 Оцінка статичних властивостей автоматичної системи

Статичні властивості автоматичної системи оцінюють за статичною характеристикою, якою називається залежність сталого значення керованої величини від збурення. Якщо стале значення помилки в системі залежить від сталого значення збурення, то система називається статичною (рис. 6.1), а якщо не залежить, – то астатичною (рис. 6.2).

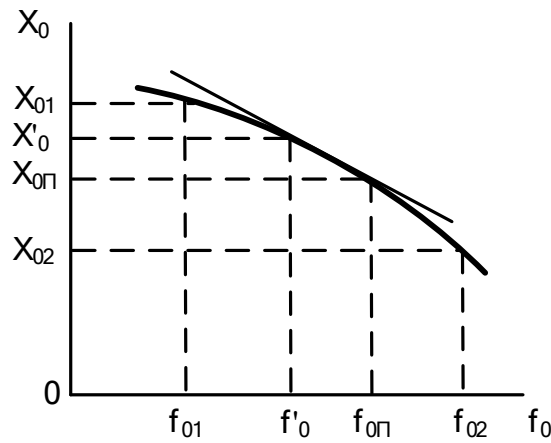


Рис. 6.1 – Статична характеристика статичної системи

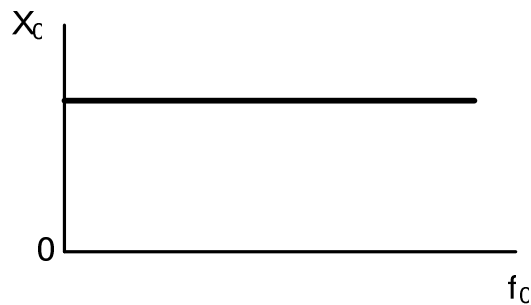


Рис. 6.2 – Статична характеристика астатичної системи

Статичні властивості системи оцінюють за декількома показниками. Один із них – це абсолютне значення статичної похибки (рис. 6.1), яке дорівнює:

$$\Delta x = |x'_0 - x_{0n}|, \quad (6.1)$$

де x'_0 – стає значення керованої величини при даному значенні збурення f'_0 ; x_{0n} – номінальне значення керованої величини.

Якщо номінальне значення керованої величини дорівнює середньоарифметичному від її максимального і мінімального значень, то:

$$x_{0n} = \frac{x_{01} + x_{02}}{2}. \quad (6.2)$$

Звідки максимальне значення похибки:

$$\Delta x_{\max} = |x_{01} - x_{0n}| = |x_{02} - x_{0n}|. \quad (6.3)$$

Другий показник – це відносна статична похибка, або статизм системи:

$$S = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{0n}} = \frac{2\Delta x_{\max}}{x_{0n}}, \quad (6.4)$$

який можна характеризувати коефіцієнтом статизму, рівним тангенсу кута нахилу статичної характеристики (рис. 6.1):

$$\chi = \operatorname{tg} \gamma. \quad (6.5)$$

Якщо система лінійна, то її статична характеристика також буде лінійною. Для такої системи:

$$\chi = \frac{x_{02} - x_{01}}{f_{02} - f_{01}}. \quad (6.6)$$

Для нелінійної системи коефіцієнт статизму визначається для кожного збурення як тангенс кута нахилу дотичної до статичної характеристики в точці, відповідній даному значенню збурення (рис. 6.1), і називається місцевим коефіцієнтом статизму.

Ефективність автоматичної системи в сталому режимі оцінюють так званим ступенем точності – відношенням абсолютної статичної помилки неавтоматизованого об'єкта керування (без регулятора) до абсолютної статичної помилки автоматичної системи (рис. 6.3):

$$S = \frac{\Delta x_H}{\Delta x}. \quad (6.7)$$

Очевидно, що чим вищий ступінь точності, тим більша ефективність автоматичної системи в сталому режимі.

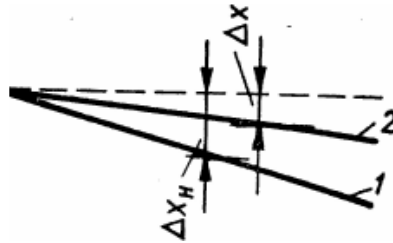


Рис. 6.3 – Статичні характеристики відповідно неавтоматизованого об'єкту керування (1) і автоматичної системи (2)

Для астатичної системи абсолютне значення статичної похибки і коефіцієнт статизму дорівнюють нулю, а ступінь точності — нескінченність.

6.2 Оцінка динамічних властивостей автоматичної системи

Для того, щоб оцінити динамічні властивості автоматичної системи, слід вирішити диференціальне рівняння системи і проаналізувати знайдене рішення. Рішення одного й того самого рівняння буде різним при різних формах вхідного збурення. Тому спочатку необхідно вирішити, яку форму вхідного збурення доцільно вибрати. Ця дія має відповідати найбільш важкому режиму роботи системи з числа тих, що можливі при її експлуатації. В той же час вона має бути достатньо простою, щоб не утрудняти рішення диференціального рівняння. Цим умовам задовольняють дії двох форм: одинична ступінчаста функція і одиничний імпульс. Тому для оцінки динаміки систем застосовують перехідну функцію як реакцію системи на одиничний стрибок – та імпульсну перехідну функцію як реакцію системи на одиничний імпульс. Перехідну й імпульсну перехідну функції одержують, вирішуючи диференціальне рівняння з нульовими початковими умовами для випадків, коли вхідна величина є одиничним стрибком і одиничним імпульсом.

Це робиться для того, щоб однозначно оцінювати різні системи, оскільки на імпульси різної інтенсивності навіть одна й та сама система реагуватиме по-різному. Із цієї ж причини вибираються однакові нульові початкові умови. Крім

того, використання стрибка або імпульсу як стандартний збурюючий сигнал має ще й ту перевагу, що через ці сигнали можна виразити безперервні сигнали будь-якої форми. Наприклад, якщо на вхід системи діє сигнал $f(t)$, то його можна представити у вигляді суми стрибків 1, 2, 3, 4 або суми імпульсів 1, 2, 3, ..., 10 певної інтенсивності, які подаються в певні моменти часу $0, t_1, t_2$ і t_3 (рис. 6.4) або через рівні проміжки часу Δt (рис. 6.5).

Знайшовши реакцію системи на кожен стрибок або імпульс і підсумувавши результат, одержимо реакцію системи на сумарний вхідний сигнал $f(t)$.

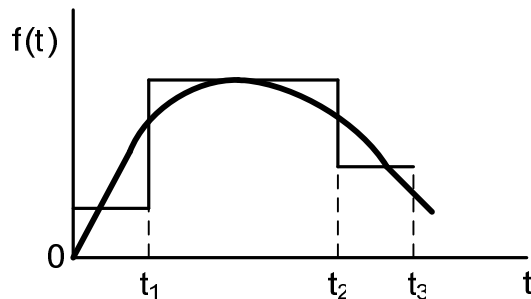


Рис. 6.4 – Часова діаграма розкладання сигналу $f(t)$ довільної форми на скачки

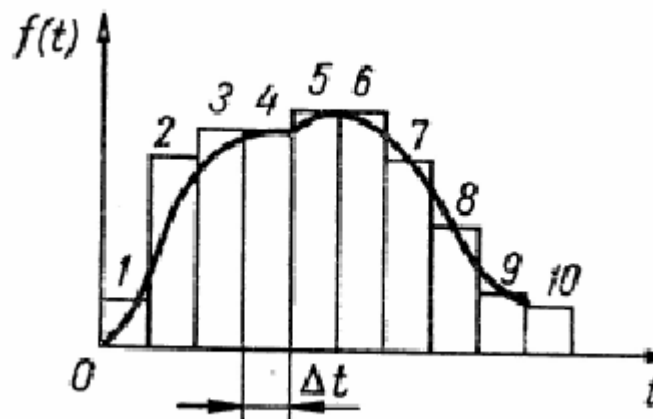


Рис. 6.5 – Часова діаграма розкладання сигналу $f(t)$ довільної форми на імпульси

Для оцінки динаміки систем може служити також операційне рівняння, з якого виходить передавальна функція — відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної величини системи.

Якщо, наприклад, операційне рівняння має вигляд:

$$(a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0)x(p) = (b_1p + b_0)f(p), \quad (6.8)$$

то передавальна функція системи дорівнює:

$$\Phi(p) = \frac{x(p)}{f(p)} = \frac{b_1p + b_0}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}. \quad (6.9)$$

Передавальну функцію системи можна легко обчислити також по передавальних функціях її окремих елементів. На практиці немає сенсу аналізувати або записувати диференціальне рівняння розімкненої системи. А передавальну функцію розімкненої системи використовують досить широко. Якщо в структурній схемі системи елементи включені послідовно, то передавальна функція розімкненої системи $W(p)$ дорівнює добутку передавальних функцій послідовно включених елементів і є відношенням двох поліномів від p , причому в реальних системах порядок поліному чисельника не може бути вищим від порядку поліному знаменника. По передавальній функції системи можна визначити статичні характеристики системи. Для оцінки динамічних характеристик потрібні додаткові дослідження самої передавальної функції.

Контрольні запитання

1. Як оцінюють статичні властивості автоматичної системи?
2. Яка автоматична система називається астатичною?
3. Яка автоматична система називається статичною?
4. Що таке абсолютне значення статичної похибки?
5. Що таке відносна статична похибка?
6. Що таке коефіцієнт статизму?
7. Чому дорівнює коефіцієнт статизму астатичної системи?
8. Яка ступінь точності астатичної системи?

9. Яким чином можна оцінити динамічні властивості автоматичної системи?
10. Яку форму вхідного збурення доцільно вибрати при оцінці динамічних властивостей автоматичної системи?
11. Що таке одинична ступінчаста функція?
12. Для чого використовується одиничний імпульс?
13. Для чого використовується перехідна функція?
14. Де використовують імпульсну перехідну функцію?

7. Типові вузли автоматичних систем

7.1 Класифікація типових вузлів автоматичних систем

Розглянемо типові вузли автоматичних систем з точки зору їх динамічних властивостей.

Динамічною ланкою, або просто ланкою, називається елемент або вузол автоматичної системи, який має певні динамічні властивості. Проаналізуємо, наприклад, схеми електричного ланцюга і механічної системи, наведені на рис. 7.1.

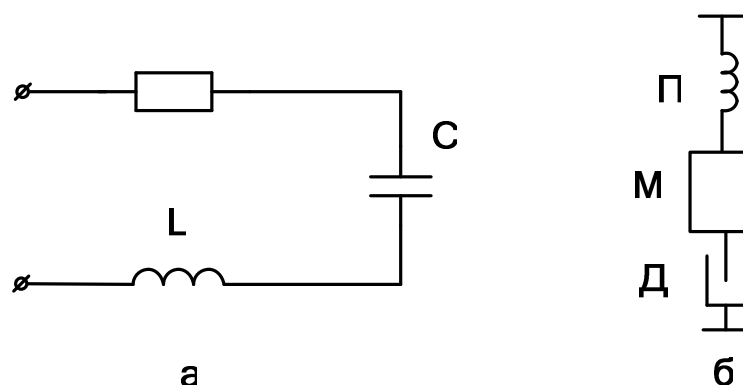


Рис. 7.1 – Схеми електричного ланцюга (а) і механічної системи (б)

Електричний ланцюг (рис. 4.1,а) складається з резистора R , конденсатора C та індуктивності L . За наявності зовнішньої напруги динамічні процеси в електричному ланцюзі описуються диференціальним рівнянням другого порядку:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = U, \quad (7.1)$$

де q – заряд конденсатора C .

Механічна система (рис. 7.1,б) складається з твердого тіла M , пружини Π та демпфера D і за наявності зовнішньої сили f диференціальне рівняння динаміки механічної системи має такий вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + cx = f, \quad (7.2)$$

де x – переміщення тіла M ;

m – маса тіла M ;

λ – коефіцієнт сили демпфера D ;

c – коефіцієнт жорсткості пружини Π .

Таким чином, рівняння динаміки електричного ланцюга і механічної системи є однотипними. Із цього можна зробити висновок, що динамічні процеси в обох системах, не дивлячись на різну їх фізичну природу, є подібними. Іншими словами, електричний ланцюг і механічна система є ланками одного типу.

Виявляється, що, не дивлячись на велику різноманітність елементів, які розрізняються між собою за фізичною природою, конструктивним оформленням, потужністю, видом споживаної енергії і т. д., можна виділити всього декілька типових ланок: пропорційні (підсилювальні), аперіодичні (інерційні), коливальні, інтегруючі, диференціюючі й форсуючі.

7.2 Аналіз типових вузлів автоматичних систем

Оцінимо динамічні властивості пропорційної ланки за реакцією ланки на вхідний сигнал типу одиничної ступінчастої функції. Якщо, наприклад, на вхід діляника напруги (рис. 7.2) раптово подати постійну напругу $U_{вх}$, величину якої умовно приймемо за одиницю, то одразу ж з'явиться і вихідна напруга $U_{вих}$. Її величина буде в k_d раз відрізнятись від величини вхідної напруги:

$$U_{вих} = k_d * U_{вх}, \quad (7.3)$$

$$\text{де } k_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1.$$

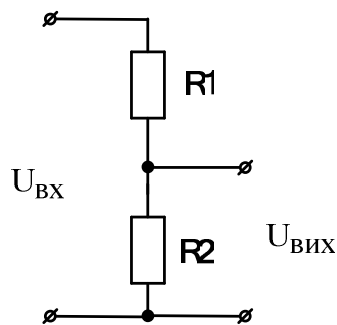


Рис. 7.2 – Схема діляника напруги

Таким чином, пропорційна ланка миттєво копіює вхідний сигнал, змінюючи його масштаб у k разів. Перехідний процес не спостерігається. Отже, пропорційна ланка є безінерційною.

Аперіодична ланка описується диференціальним рівнянням:

$$T \frac{dx_{вих}}{dt} + x_{вих} = kx_{вх}, \quad (7.4)$$

де T – постійна часу;

k – коефіцієнт передачі.

Передавальна функція аперіодичної ланки має такий вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (7.5)$$

Перехідна функція аперіодичної ланки досягає свого сталого значення k не одразу, а поступово за експоненціальним (аперіодичним) законом (рис. 7.3), через що ланка й одержала своє найменування.

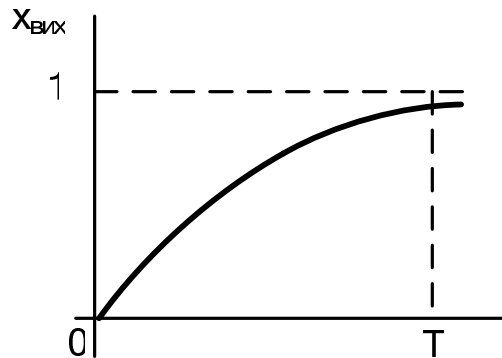


Рис. 7.3 – Перехідна функція аперіодичної ланки

Аперіодична ланка відображає інерційність процесу, причому мірою інерційності є постійна часу T . Перехідний процес закінчується при $t = (3 - 4)T$. Чим менше T , тим аперіодична ланка ближче по своїх динамічних властивостях до пропорційної ланки.

Елемент автоматичної системи може бути відображений аперіодичною ланкою, якщо він містить хоча б один накопичувач енергії. Такими накопичувачами в електричних ланцюгах є конденсатор C та індуктивність L . У конденсаторі накопичується енергія електричного поля, а в індуктивності – магнітного.

Елемент автоматичної системи може бути відображений коливальною ланкою, якщо він містить як мінімум два накопичувачі різних видів енергії: в одному накопичується потенційна енергія, а в іншому – кінетична. Канал, по якому накопичувачі обмінюються енергією, має опір. На ньому відбуваються безповоротні втрати енергії. Мірою цих втрат є коефіцієнт ξ , який чим більший, тим більші втрати енергії. При $0 < \xi < 1$ перехідний процес коливальний, причому що менше ξ , то коливання інтенсивніші. В ідеальному

випадку $\xi = 0$. Це означає, що втрат енергії немає і елемент зберігає незмінним первинний запас енергії. Тоді перехідний процес буде незгасаючим. Якщо $\xi \geq 1$, то втрати енергії настільки великі, що перехідний процес перестає бути коливальним. У цьому випадку ланку називають аперіодичною другого порядку і його можна замінити двома послідовно сполученими аперіодичними ланками.

Прикладами коливальної ланки є розглянуті раніше електричний ланцюг і механічна система (рис. 7.1). В електричному ланцюзі ємність C накопичує енергію електричного поля (потенційна енергія), а індуктивність L – енергію електромагнітного поля (кінетична енергія). Безповоротні втрати відбуваються на опорі R . Якщо опір R невеликий, то контур буде коливальним. У механічній системі рушійна маса накопичує кінетичну, а пружина – потенційну енергію. Втрати енергії відбуваються в демпфері.

Інтегруючою називається така ланка, вихідна величина якої пропорційна інтегралу за часом від вхідної величини:

$$x_{\text{вих.}}(t) = k \int_0^t x_{\text{вх.}}(t) dt . \quad (7.6)$$

Продиференціюємо ліву і праву частини цього рівняння:

$$\frac{dx_{\text{вих.}}(t)}{dt} = k x_{\text{вх.}}(t) . \quad (7.7)$$

З формули (7.7) видно, що швидкість зміни вихідної величини інтегруючої ланки пропорційна вхідній величині. При цьому коефіцієнт передачі k чисельно дорівнює швидкості зміни вихідної величини при одиничному значенні вхідної величини. Тому його називають коефіцієнтом передачі за швидкістю. Якщо вхідна і вихідна величини мають однакові розмірності, наприклад є напругою, то розмірність k дорівнює сек^{-1} . У цьому

випадку зручно застосовувати не коефіцієнт передачі, а постійну часу інтегруючої ланки:

$$T = \frac{1}{k}. \quad (7.8)$$

Тоді рівняння ланки набуде вигляду:

$$U_{\text{вих.}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^t U_{\text{вх.}}(t) dt, \quad (7.9)$$

або

$$T \frac{du_{\text{вих}}}{dt} = u_{\text{вх}}(t). \quad (7.10)$$

При постійному (східчастому) вхідному сигналі вихідний сигнал інтегруючої ланки змінюється з постійною швидкістю, тому його перехідна функція безперервно зростає за лінійним законом.

Відмітною властивістю інтегруючої ланки є та, що після припинення дії вхідного сигналу вихідний сигнал ланки залишається на тому самому рівні, на якому він був у момент зникнення вхідного сигналу. Інакше кажучи, інтегруюча ланка має властивість «запам'ятовувати», тобто утримувати останнє значення вихідної величини (рис. 7.4). Завдяки «пам'яті» інтегруючої ланки досягається астатизм автоматичної системи керування.

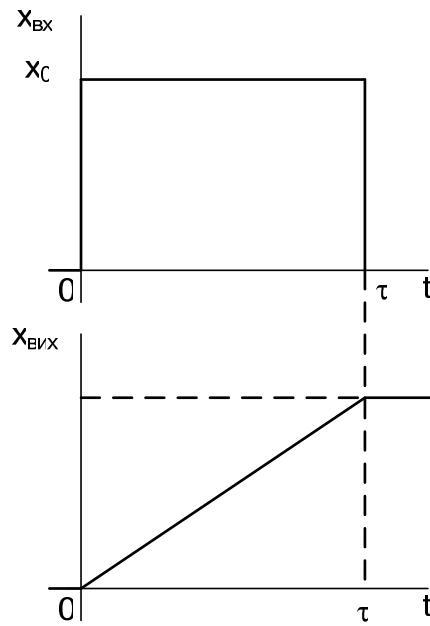


Рис. 7.4 – Характеристика інтегруючої ланки при подачі на вхід прямокутного імпульсу

У диференційній ланці вихідна величина пропорційна похідній за часом від вхідної:

$$x_{\text{вих}}(t) = k \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (7.11)$$

Іншими словами, вихідна величина диференційної ланки пропорційна швидкості зміни вхідної величини.

Якщо вхідна і вихідна величини ланки мають однакову розмірність, наприклад є напругою, то розмірність k дорівнює секунді. Тоді рівняння ланки зручно записувати у вигляді:

$$U_{\text{вих}}(t) = T \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt}, \quad (7.12)$$

де T – постійна часу диференційної ланки.

Прикладом диференційної ланки є тахогенератор, оскільки напруга, що виробляється ним, пропорційна швидкості обертання його якоря, яка є похідною за часом від кута повороту.

Диференційна ланка не пропускає постійного за величиною сигналу, але при подачі на його вхід ступінчастого сигналу на виході буде імпульс типу дельта-функції.

До типових ланок належать і форсуючі ланки. Розрізняють форсуючі ланки першого і другого порядку. Форсуючі ланки можна сформувати з диференційних і підсилювальних. Наприклад, форсуюча ланка першого порядку описується диференціальним рівнянням:

$$x_{\text{вих}}(t) = k \left[x_{\text{вх}}(t) + T \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} \right]. \quad (7.13)$$

Таку ланку можна одержати шляхом паралельного з'єднання диференційної та підсилювальної ланок.

Контрольні запитання

1. Що називається динамічною ланкою?
2. Що таке пропорційні ланки?
3. Що таке аперіодична ланка?
4. Які характеристики у коливальної ланки?
5. Яка ланка називається інтегруючою?
6. Що таке форсуючі ланки?
7. Як отримати форсуючі ланки?

8. Якість перехідних процесів у автоматичних системах

8.1 Показники якості перехідних процесів

У стійкій системі перехідний процес завжди згасає. Проте для практики зовсім не байдужий характер перехідного процесу. Так, наприклад, якщо перехідний процес згасає і система довго входить в новий сталий режим, то вона має недостатню бистродію і її використання обмежене.

Тому стійкість є необхідною, але недостатньою умовою працездатності автоматичних систем. Достатньою умовою є якість процесів регулювання, яка оцінюється за якістю перехідних процесів і похибками в сталих режимах.

Якість перехідних процесів оцінюють за перехідною функцією $h(t)$, яка є реакцією системи на зовнішню дію типу одиничної ступінчастої функції $1(t)$. Для систем стеження і систем керування розглядають перехідну функцію по відношенню до задаючої дії, а для систем стабілізації – по відношенню до збурення.

Основними показниками якості перехідного процесу є:

- час регулювання;
- перерегулювання;
- основна частота коливань;
- кількість коливань;
- максимальна швидкість регульованої величини;
- максимальне прискорення регульованої величини.

8.2 Оцінки якості перехідних процесів

Розглянемо показники якості на прикладі перехідного процесу, приведеному на рис.8.1.

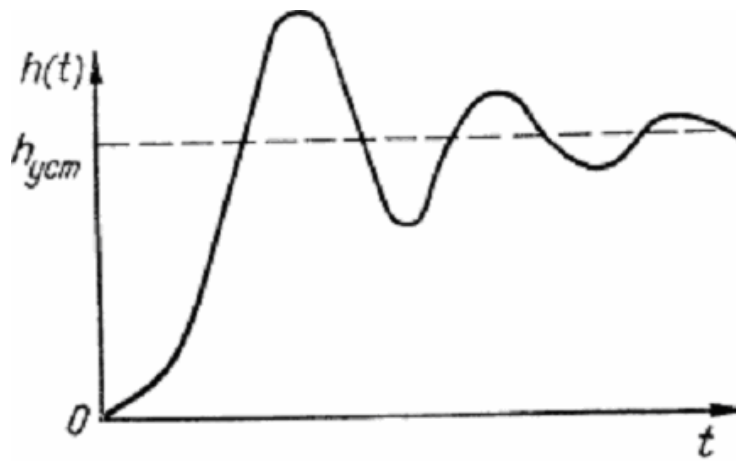


Рис. 8.1 – Часова діаграма перехідного процесу стійкої системи з перерегулюванням

Час регулювання t_p визначається тривалістю перехідного процесу. Теоретично перехідний процес триває нескінченно довго, проте на практиці вважають, що він закінчується, щойно відхилення регульованої величини від нового її сталого значення не перевищуватимуть допустимих меж, і складає $\varepsilon = (3 - 5)\%$ від $h_{уст}$. Час регулювання характеризує швидкодію системи. Але іноді швидкодію характеризують також за часом досягнення перехідною функцією перший раз нового сталого значення або за часом досягнення максимального значення.

Перерегулювання Δh_{max} – це максимальне відхилення регульованої величини від нового сталого значення. Перший максимум є найбільшим, а відносне перерегулювання обчислюють за формулою:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Час регулювання і перерегулювання як основні показники перехідного процесу тісно пов'язані між собою. Може здаватися, що перерегулювання неприпустиме, оскільки воно збільшує час регулювання, однак це не так. За наявності перерегулювання система до нового сталого стану підходить із певною швидкістю. Чим більша ця швидкість, тим далі за нове стає положення пройде система за інерцією. Для зменшення перерегулювання необхідно зменшити

швидкість, із якою система підходить до нового сталого стану, що врешті-решт приведе до збільшення часу регулювання. Якщо система підходить до сталого стану з нульовою швидкістю – то перерегулювання взагалі не буде, але час регулювання значно збільшиться (рис. 8.2).

Оскільки час регулювання характеризує швидкодію системи – прагнуть там, де це необхідно, звести його до мінімуму. Це означає, що система має відпрацьовувати завдання з великою швидкістю, що у результаті приводить до великого перерегулювання. Крім того, оскільки перехідний процес коливальний, матимуть місце великі прискорення регульованої величини, що може викликати неприпустимо великі динамічні навантаження на елементи системи.

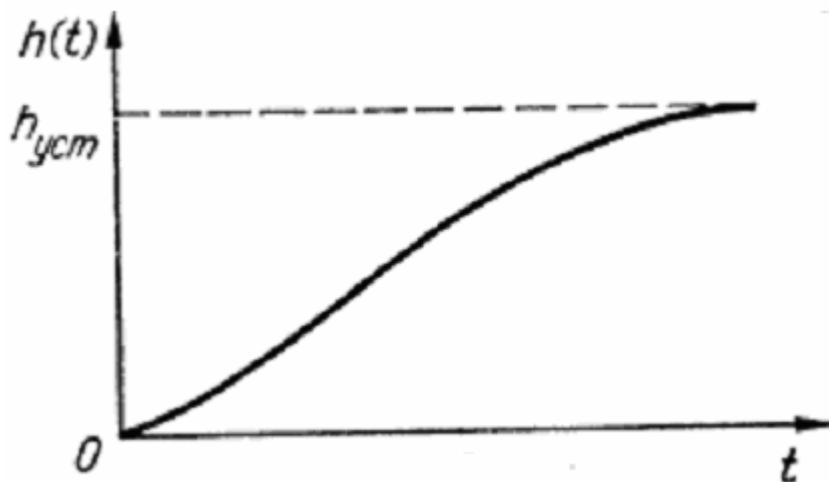


Рис. 8.2 – Часова діаграма перехідного процесу стійкої системи без перерегулювання

Таким чином, як відсутність, так і дуже велике перерегулювання – небажані. Тому як оптимальне допускають перерегулювання в межах 20–30%. При цьому число напівколивань перехідної функції дорівнює 2 – 3.

Для деяких систем перерегулювання взагалі неприпустиме. Необхідно також мати на увазі, що прагнення зменшити час регулювання приводить до збільшення потужності виконавчого пристрою.

Контрольні запитання

1. Що називається перерегулюванням?
2. Які є основні показники якості перехідного процесу?
3. За якими ознаками оцінюють якість перехідних процесів?
4. Що таке час регулювання?
5. Що є достатньою умовою якості процесів регулювання?
6. Чому стійкість є необхідною, але недостатньою умовою працездатності автоматичних систем?
7. До чого приводить прагнення зменшити час регулювання?

8.3 Обчислення похибок автоматичної системи

При розгляді автоматичних систем із точки зору передачі й перетворення сигналів виникає питання про точність передачі цих сигналів. Зокрема, цікавить точність відтворення задаючої дії, а саме із яким ступенем точності виконується основна умова:

$$x_{\text{вих}}(t) = x_{\text{вх}}(t). \quad (8.2)$$

Окрім того, необхідно визначити помилки, викликані збуренням $f(t)$.

Похибка системи за задаючою дією:

$$\Delta x(t) = x_{\text{вх}}(t) - x_{\text{вих}}(t), \quad (8.3)$$

а по збуренню:

$$\Delta x(t) = -x_{\text{вих}}(t), \quad (8.4)$$

тобто похибка системи від збурення чисельно дорівнює зміні регульованої величини під впливом цього збурення (за відсутності задаючої дії).

Зважаючи на наявність перехідних процесів поточне значення помилки $\Delta x(t)$ різко міняється і не може служити мірою точності автоматичних систем. Тому домовились точність автоматичних систем оцінювати за величиною сталої похибки, яка має місце в стійкій системі після завершення перехідного процесу.

Звідки, використовуючи теорему операційного числення про кінцеве значення функції, одержимо формулу для обчислення сталої похибки за задаючою дією:

$$\Delta x_{уст} = \lim p * \Phi_{\Delta}(p) * x_{вх}(p). \quad (8.5)$$

Для визначення сталої похибки від збурення, необхідно використати залежність:

$$\Delta x_{уст} = \lim p * \Phi_f(p) * F(p), \quad (8.6)$$

де $\Phi_f(p)$ – передавальна функція за збуренням.

Таким чином, із формул (8.5) і (8.6) витікає, що точність автоматичних систем залежить, по-перше, від зовнішньої дії $x_{вх}(t)$ або $f(t)$ і, по-друге, від властивостей автоматичної системи, що відображаються передавальними функціями $\Phi_{\Delta}(p)$ або $\Phi_f(p)$.

У загальному випадку як задаюча, так і збурююча дія є складною функцією часу, що значно ускладнює обчислення похибок. Щоби вийти з такого положення, необхідно замінити реальні дії типовими, тобто достатньо простими для того, щоби можна було визначити похибки. Це зручно зробити при типових діях. Як такі дії застосовують ступінчасту $m * 1(t)$, лінійну $v * t$, і квадратичну $(a * t)/2$ функції. Можна застосовувати і складніші дії.

Усі ці дії просто виражаються за допомогою формул, їх значення можна точно обчислити для будь-якого моменту часу. Зважаючи на це, вони називаються детермінованими, або регулярними.

8.4 Похибки від органів керування

Розглянемо похибки деяких автоматичних систем.

Статичні системи при ступінчастій дії мають сталу похибку:

$$\Delta x_{уст} = \frac{x_0}{1 + k}, \quad (8.7)$$

яка називається статичною, або похибкою за положенням. Вона пропорційна величині задаючої дії і зменшується зі збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи k . При діях, що змінюються в часі, похибка безперервно зростає. Наявність статичної похибки є характерною властивістю статичних систем.

Астатичні системи 1-го порядку точно відпрацьовують ступінчасту дію, але мають постійну похибку при відпрацюванні лінійно зростаючого сигналу. Ця похибка пропорційна швидкості зміни вхідного сигналу:

$$\Delta x_{уст} = \frac{v}{k}. \quad (8.8)$$

Зважаючи на це, її називають швидкісною помилкою, а коефіцієнт передачі розімкненої системи k – добротністю системи за швидкістю. Відсутність статичної помилки пояснюється наявністю в структурній схемі системи інтегруючої ланки.

Астатичні системи 2-го порядку точно відпрацьовують як ступінчастий, так і лінійно зростаючий сигнал. При відпрацюванні квадратичного сигналу має місце похибка, яка пропорційна прискоренню a вхідного сигналу і обернено пропорційна коефіцієнту посилення розімкненої системи k , який називається добротністю системи за прискоренню, а сама похибка – похибкою системи за прискоренням:

$$\Delta x_{уст} = \frac{a}{k} \quad (8.9)$$

Отже, зі збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи сталі похибки зменшуються, але погіршується стійкість автоматичних систем. Таким чином, вимога до точності суперечить вимозі до стійкості. При виборі величини k має бути ухвалене компромісне рішення.

Контрольні запитання

1. Що називається похибкою по положенню?
2. Що називається статичною похибкою?

3. Яка похибка є характерною властивістю статичних систем?
4. Зі збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи сталі похибки зменшуються чи збільшуються?
5. Що погіршує стійкість автоматичних систем?
6. Точність суперечить вимозі до стійкості системи чи ні?
7. Чи мають астатичні системи статичну похибку?

9. Корекція автоматичних систем

У системах, побудованих на принципі керування за відхиленням, незважаючи на наявність регулятора та основних функціонально необхідних елементів, не завжди можна одержати необхідні показники якості. Для замкнутих систем керування це пояснюється тим, що умови досягнення високої точності в установленому режимі не співпадають із умовами одержання високих показників якості в перехідному режимі.

Для зменшення похибки в установленому режимі необхідно підвищувати коефіцієнт підсилення системи в розімкнутому стані. У той же час із підвищенням цього коефіцієнта зменшується запас стійкості системи та погіршується перехідний процес. Можливо навіть, що система стане нестійкою раніш, ніж вдасться одержати необхідний коефіцієнт підсилення. Тому, з метою зменшення похибки керування та збереження стійкості системи, необхідно відповідним чином внести зміни до частотних характеристик системи, тобто зробити корекцію системи.

Як видно з рис. 9.1, зі збільшенням коефіцієнта підсилення системи k збільшується її частота зрізу ω_c ($\omega_{c2} > \omega_{c1}$).

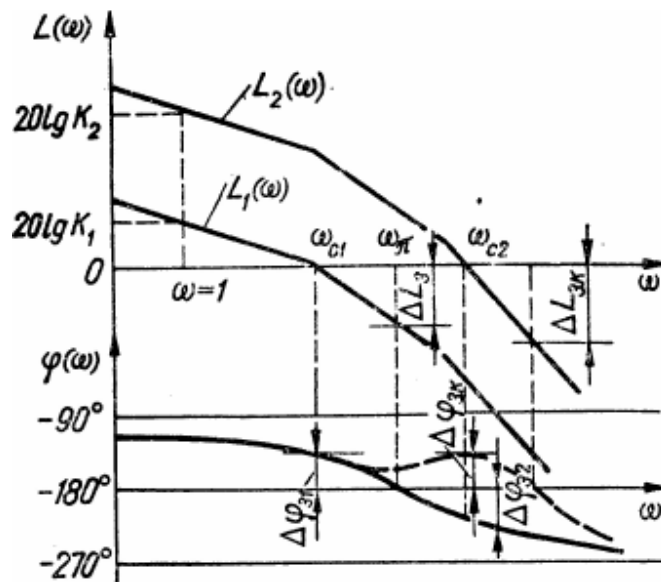


Рис. 9.1 – Логарифмічні частотні характеристики системи стеження: $L_1(\omega)$ і $L_2(\omega)$ – при коефіцієнтах підсилення відповідно k_1 і k_2 , де $k_1 < k_2$

Таким чином, погіршення перехідного процесу і втрата стійкості при збільшенні коефіцієнта підсилення k системи пов'язані з наявністю в ній запізнювання коливань по фазі.

Для того, щоб при збільшенні коефіцієнта підсилення k система залишалася стійкою і забезпечувався необхідний запас стійкості по фазі, необхідно частково компенсувати запізнювання в смузі частот, яка розташована до частоти зрізу ω_{c2} . Це можна здійснити включенням послідовно елементів системи пристрою, який, на відміну від інших елементів, вносив би не запізнювання, а випередження по фазі синусоїдальних коливань у вказаній вище смузі частот.

Для цього потрібно скласти напругу сигналу розузгодження з похідною від нього (рис. 9.2). Таке складання здійснюють за допомогою диференціального фазоопереджувача пристрою.

Розглянемо фізичний зміст введення похідної в закон регулювання, який ілюструє рис. 9.3. Якщо система реагує тільки на сигнал розузгодження, то запізнювання цього сигналу при проходженні через інерційні елементи системи почне відпрацьовувати не одразу, а за деякий час після його появи.

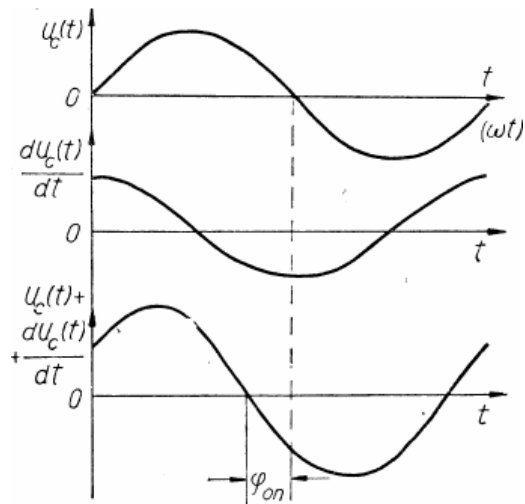


Рис. 9.2 – Часова діаграма складання синусоїдального сигналу з похідною від нього

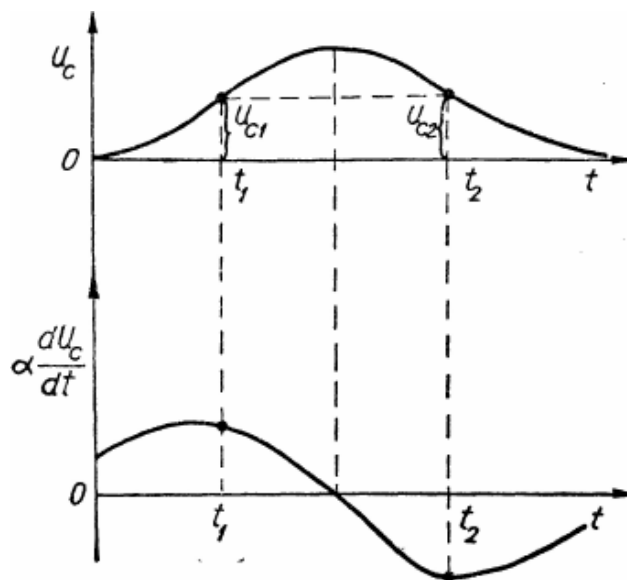


Рис. 9.3 – Часова діаграма, що ілюструє введення похідної в закон регулювання

Якщо ж на виконавчий орган системи поступатиме напруга пропорційна не тільки сигналу розузгодження, але і його похідної, то виконавчий орган системи почне відпрацьовувати похибку значно раніше і швидше, оскільки похідна при малому сигналі розузгодження має кінцеве значення.

Контрольні запитання

1. Що буде, якщо система реагує тільки на сигнал розузгодження?
2. Що необхідно для зменшення похибки в установленному режимі?
3. Що необхідно зменшення похибки керування та збереження стійкості?
4. Із збільшенням коефіцієнта підсилення системи збільшується її частота зрізу чи ні?
5. Який фізичний смисл введення похідної в закон регулювання?
6. Як реагує виконавчий орган при наявності похідної від сигналу розузгодження?
7. Для чого необхідно вводити в систему фазопереджуючий пристрій?

10. Багаторівневі системи керування

Багаторівневі системи керування набули найбільшого поширення при впровадженні сучасних частотно-регульованих асинхронних електроприводів із мікропроцесорними системами керування на електричному транспорті.

Багаторівневі системи керування призначені для реалізації режимів роботи тягового асинхронного електроприводу, керування роботою допоміжного обладнання, контролю та діагностування електрообладнання.

10.1 Структура багаторівневої системи керування

Розглянемо структуру багаторівневої системи керування, наведену на рис. 10.1, яку можна впровадити, наприклад, на трамвайному вагоні або вагоні метрополітену.

На рис. 10.1 прийняті наступні позначення:

ЦСК – центральна система керування;

ДИСП – багатофункціональний дисплей;

СК ТЕП – система керування тягового електроприводу;

СК ІН 1, СК ІН 2 – системи керування відповідно першого та другого інверторів напруги;

СФ33 – система формування зворотних зв'язків;

СКД – система контролю та діагностики,

СК ДО – система керування допоміжним обладнанням;

СК БЖ 24В – система керування блоку живлення 24 В;

СК БЖ 220В – система керування блоку живлення 220 В;

СК ОП – система керування опалення;

СК ВЕН – система керування вентиляції.

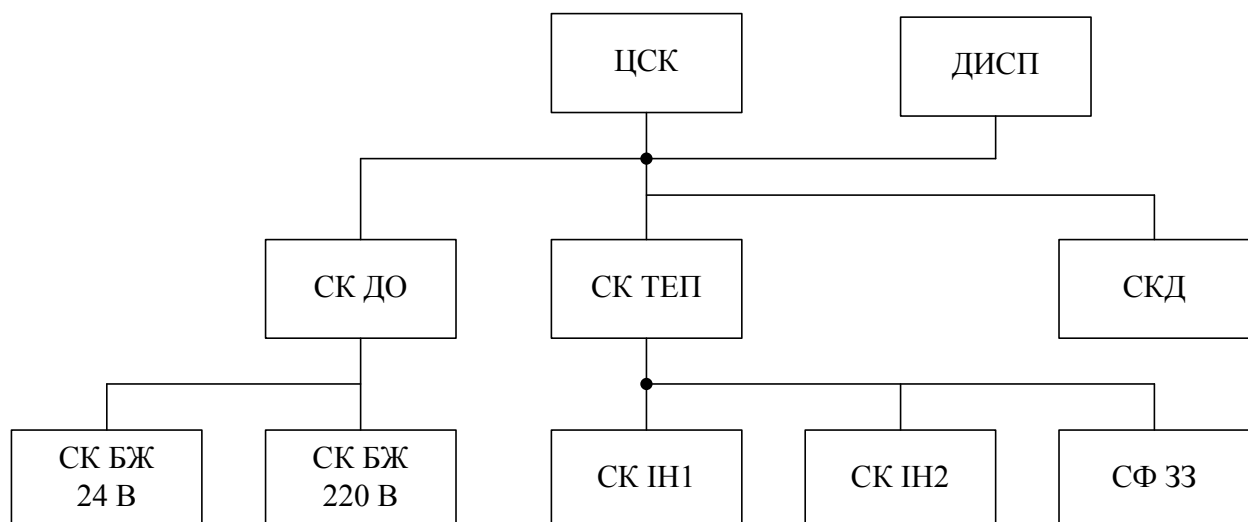


Рис. 10.1 – Структура багаторівневої системи керування

Багаторівнева система керування – підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має центральна система керування з дисплеєм. У центральній системі керування формуються команди, якими задаються режими роботи систем другого рівня. Ці команди висвітлюються на багатофункціональному дисплеї. На другому рівні – система керування тягового електроприводу, система контролю та діагностики і система керування допоміжним обладнанням, які формують відповідні команди для систем керування третього рівня. Системи керування інверторами напруги, система

формування зворотних зв'язків, а також системи керування блоками живлення 24 В і 220 В, системи керування опаленням, вентиляцією та ін. мають найнижчий, третій рівень.

Зв'язок між ЦСК та системами керування другого рівня і системами керування другого й третього рівнів здійснюється зазвичай цифровими каналами зв'язку. Це покращує перешкодостійкість при передачі інформації.

Інформація про роботу окремих вузлів, агрегатів і систем направляється у зворотному напрямку по цифрових каналах зв'язку до ЦСК і висвітлюється на багатофункціональному дисплеї.

10.2 Складові багаторівневої системи керування

Розглянемо структуру системи керування, яка забезпечує реалізацію режимів роботи тягового електроприводу. Структура такої системи керування залежить від структури тягового електроприводу.

Для прикладу розглянемо тяговий електропривод із чотирма асинхронними електродвигунами (ТАД), який живиться від мережі постійного струму. Для такого електроприводу можна виділити три основні структурні схеми:

- з одним автономним інвертором напруги;
- з двома автономними інверторами напруги;
- з чотирма автономними інверторами напруги.

На рис. 10.2 наведена структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги для всіх тягових електродвигунів.

Така схема забезпечує високі масо-габаритні показники щодо електричного обладнання, але має вагомий недолік – у випадку виходу з ладу автономного інвертора напруги або відмови в його системі керування – виключається можливість роботи електричного приводу. Тому схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги не набула широкого використання як тягового.

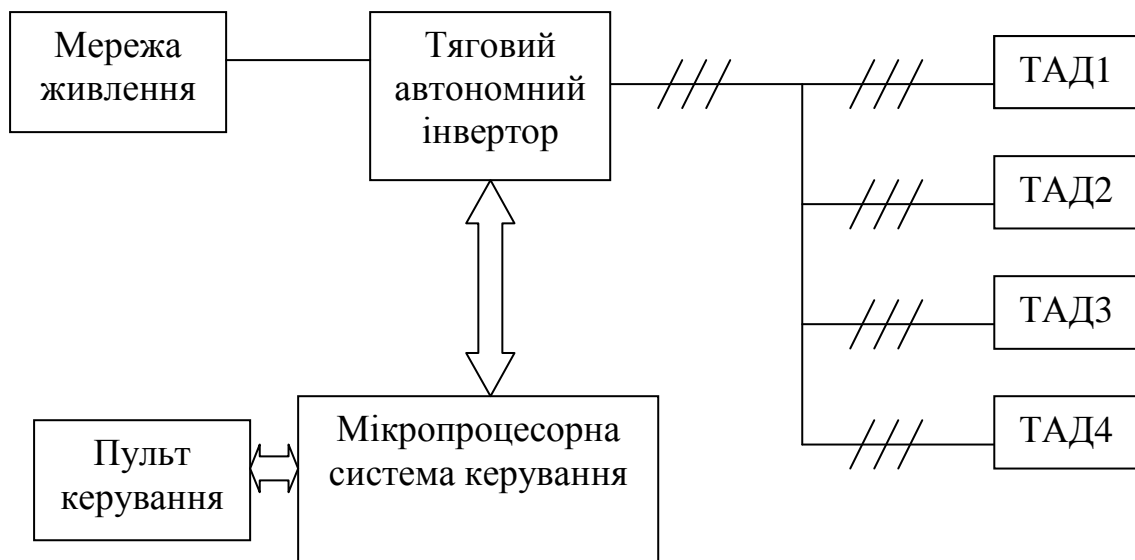


Рис. 10.2 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги

Більш доцільною (з точки зору надійності й оптимальних масо-габаритних показників) є структурна схема електричного приводу, в якій від одного автономного інвертора напруги живиться два ТАД (рис. 10.3).

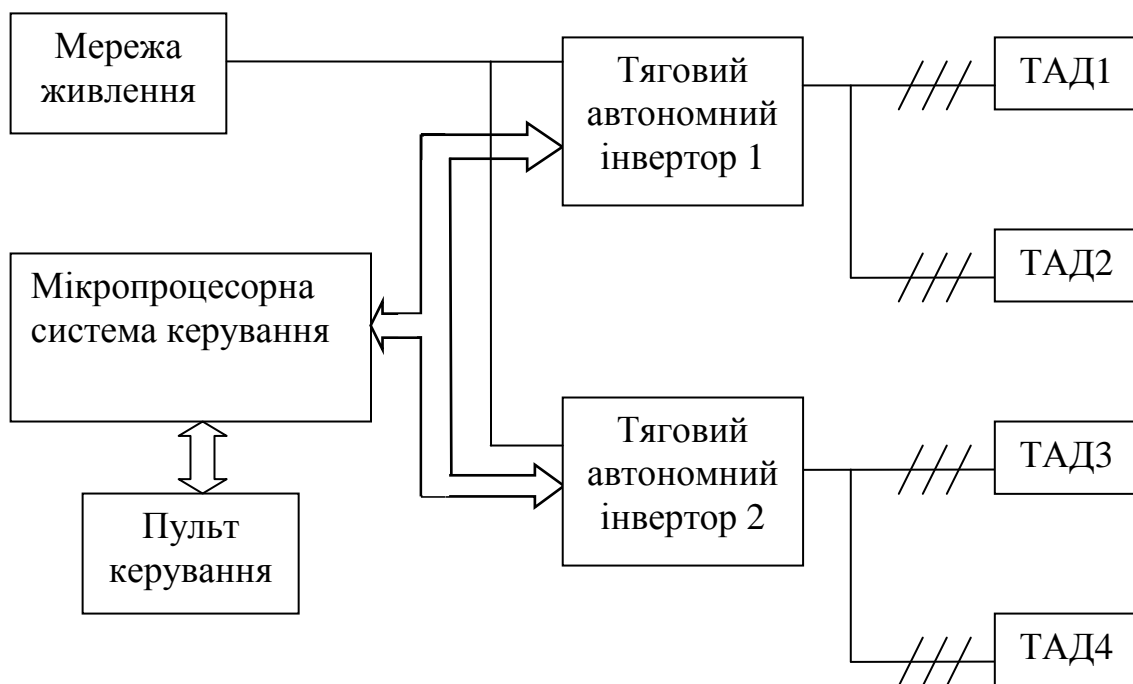


Рис. 10.3 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги на два електродвигуни

В цьому випадку при відмові одного з двох інверторів 50 % тягової потужності зберігається і рухомий склад може (без пасажирів) пересуватися в депо самостійно, що виключає затримку руху на лінії.

Недоліком такої структури є те, що у випадку виходу з ладу одного автономного інвертора напруги тільки 50 % тягової потужності зберігається, що не дозволяє перевозити пасажирів.

Найбільш надійною є структура електричного приводу з індивідуальними автономними інверторами напруги на кожен тяговий двигун (рис. 10.4).

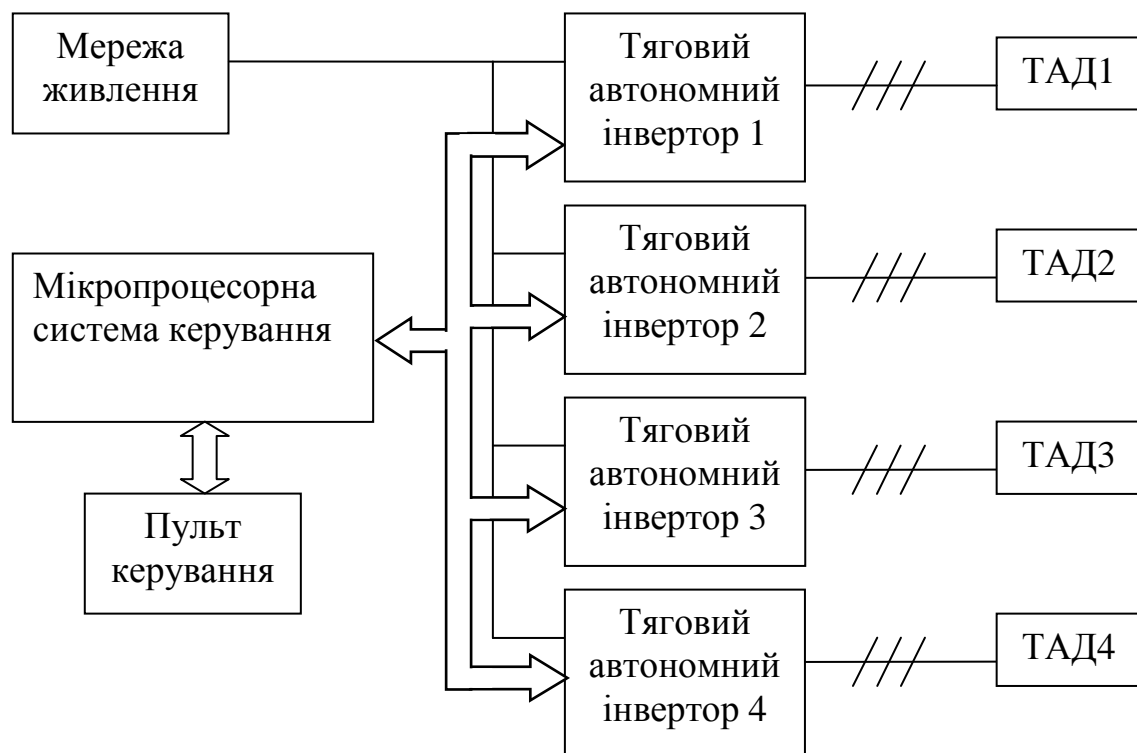


Рис. 10.4 – Структурна схема електроприводу з індивідуальними автономними інверторами напруги

За такої структури в разі відмови одного автономного інвертора напруги потужність електроприводу знижується лише на 25 %, що дозволяє пересуватися рухомому складу з мінімальними втратами потужності.

До недоліків такої схеми належать гірші масо-габаритні показники електричного обладнання.

Одна з основних вимог при розробці електрообладнання – це його уніфікація. Тому окремі вузли та блоки при реалізації мікропроцесорної системи керування мають бути уніфікованими не залежно від того, яку структуру має схема електроприводу.

Розглянемо спрощену структуру системи керування для тягового асинхронного електроприводу з одним двигуном, наведену на рис.10.5.

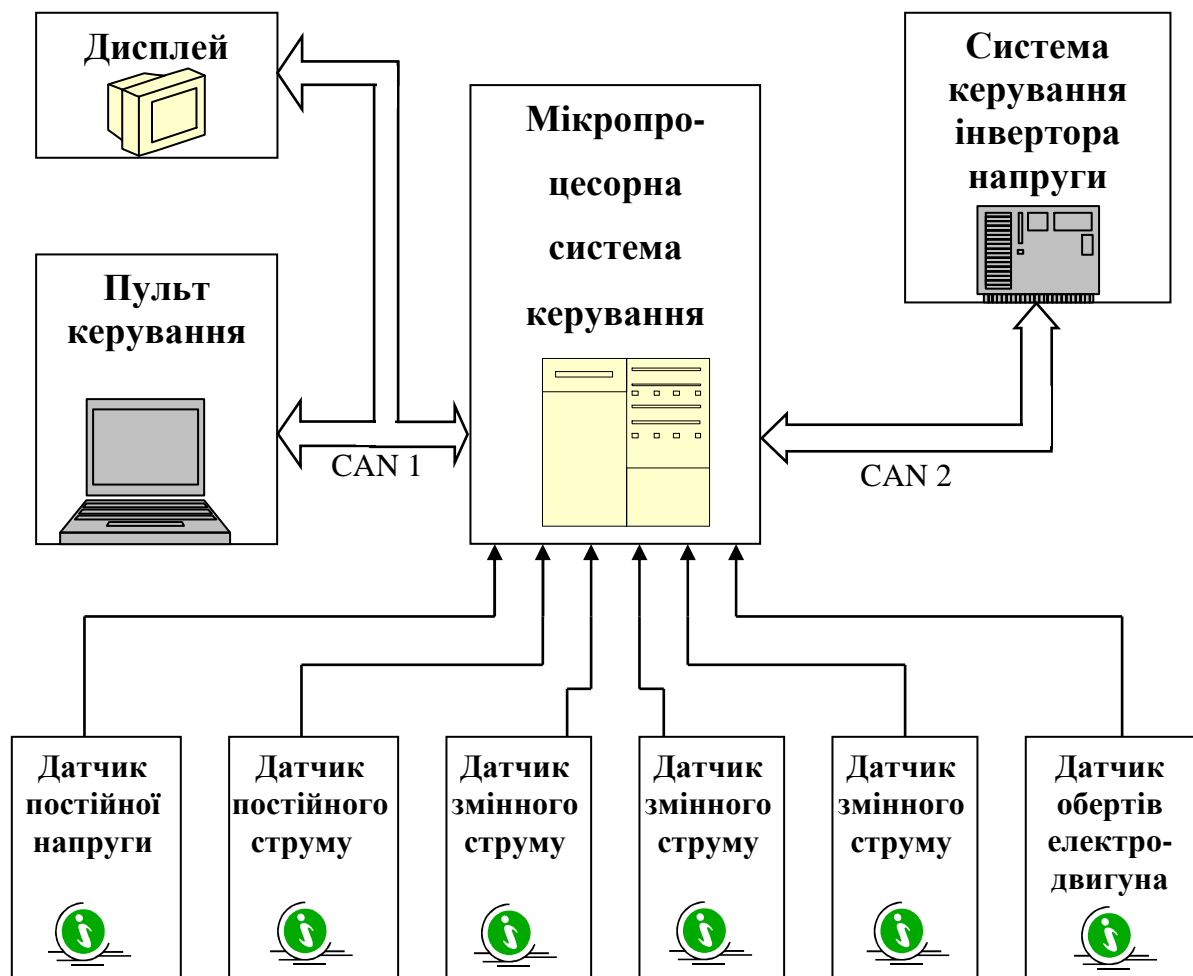


Рис. 10.5 – Структура системи керування для тягового асинхронного електроприводу з одним електродвигуном

До складу системи керування електроприводом входять:

- пульт керування;
- мікропроцесорна система керування;
- системи керування інвертором напруги;
- датчик постійної напруги;

- датчик постійного струму;
- датчики змінного струму за числом фаз;
- датчик обертів електродвигуна;
- дисплей.

Система керування асинхронним електроприводом підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має пульт керування.

На другому рівні – мікропроцесорна система керування.

Система керування інвертором напруги має найнижчий, третій рівень.

Це умовно позначається таким чином: пульт керування – Master для мікропроцесорної системи керування, а вона для нього – Slave. У свою чергу мікропроцесорна система керування – Master для системи керування інвертора напруги, а остання – Slave для першої.

Зв'язок між пультом керування та мікропроцесорною системою керування здійснюють цифровим каналом зв'язку CAN1, а зв'язок між мікропроцесорною системою керування та системою керування інвертора напруги – цифровим каналом зв'язку CAN2.

Датчики постійної напруги та постійного струму необхідні для формування зворотного зв'язку за потужністю.

Датчики змінного струму необхідні для формування зворотного зв'язку з фазного струму.

Датчик обертів електродвигуна необхідний для частотного каналу.

Дисплей відображає режим роботи електроприводу.

Контрольні запитання

1. Для чого призначені багаторівневі системи керування?
2. У багаторівневій системі керування системи нижчого рівня підпорядковані системам вищого рівня чи навпаки?
3. Як здійснюється зв'язок між системами різних рівнів?

4. Куди поступає інформація про роботу окремих вузлів, агрегатів і систем ?
5. Які складові входять до системи керування електроприводом ?
6. Як умовно називають системи одного рівня по відношенню до іншого?

11. Мікропроцесорні системи керування

Місце мікропроцесорної системи керування в структурі системи керування тягового асинхронного електроприводу видно з рис. 10.5. МПСК пов'язана з пультом керування та системою керування інвертором напруги цифровими каналами зв'язку CAN1 та CAN2. По цифровому каналу зв'язку CAN1 до МПСК надходять сигнали керування з пульта, а у зворотному напрямку йде інформація про режими роботи та основні параметри систем електроприводу. По цифровому каналу зв'язку CAN2 з МПСК надходять сигнали керування до системи керування інвертором напруги, а у зворотному напрямку йде інформація про режими роботи та основні параметри інвертора напруги. Крім того, до МПСК надходять сигнали від датчиків напруги, струму та обертів електродвигуна. Якщо датчики об'єднані в систему формування зворотних зв'язків, то вказані сигнали можуть поступати до МПСК по цифровому каналу зв'язку CAN3.

У МПСК формуються керуючі сигнали для системи керування інвертором напруги, які забезпечують реалізацію необхідних законів керування електроприводом.

11.1 Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування

Статичні характеристики електроприводу, які формує система керування для тягового та гальмівного режимів можна розрахувати, використовуючи основні положення теорії електричної тяги. При розрахунках усі розмірності слід приводити в системі СІ.

Сила тяги витрачається на подолання сили опору руху рухомого складу та забезпечення йому заданого прискорення:

$$F = m * a + W, \quad (11.1)$$

де m – наведена маса рухомого складу;

a – задане прискорення рухомого складу;

W – сила опору руху рухомого складу.

Максимальна сила тяги дорівнює:

$$F_{\max} = m * a_{\max} + W, \quad (11.2)$$

де a_{\max} – максимальне прискорення рухомого складу.

Потужність електроприводу дорівнює:

$$P = P_{\text{пит}} * G, \quad (11.3)$$

де $P_{\text{пит}}$ – питома потужність електроприводу;

G – вага рухомого складу.

Потужність тягового електродвигуна:

$$P_{\text{дв}} = P / n, \quad (11.4)$$

де n – кількість електродвигунів електроприводу.

Мінімальну швидкість руху рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні можна прийняти рівною:

$$V_1 = V_{\min}, \quad (11.5)$$

де $V_{\min} = 5$ км/год.

Максимальна швидкість рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_2 = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / F_{\text{мах}}, \quad (11.6)$$

де $\eta_{\text{ред}}$ – ККД редуктора.

Для забезпечення незмінного тягового зусилля (при $V_1 \geq V \geq V_2$) треба дотримуватись закону керування:

$$U_1 / f_1 = \text{const.} \quad (11.7)$$

Подальше формування тягової характеристики (при $V > V_2$) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила тяги дорівнює:

$$F = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / V. \quad (11.8)$$

Для забезпечення незмінної потужності електроприводу треба додержуватись закону керування:

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const.} \quad (11.9)$$

Для забезпечення незмінної швидкості рухомого складу потрібно додержуватись закону керування:

$$V = \text{const.} \quad (11.10)$$

На основі (11.5), (11.6) та (11.8) можна розрахувати та побудувати граничну тягову характеристику.

Для розрахунку та побудови механічної характеристики електроприводу, яка має формуватися системою керування, можна скористатися формулами:

$$M = F * D_k / (2 * i_{ред} * \eta_{ред}), \quad (11.11)$$

$$n_{дв} = 60 * i_{ред} * V / (3,6 * \pi * D_k), \quad (11.12)$$

$$M = P_{дв} * \pi / (30 * n_{дв}), \quad (11.13)$$

$$i_{ред} = 3,6 * \pi * D_k * n_{дв max} / (V_{max} * 60), \quad (11.14)$$

$$\omega = 2 * \pi * n_{дв} / 60, \quad (11.15)$$

де D_k – діаметр колеса;

$i_{ред}$ – передавальне число редуктора;

V_{max} – максимальна швидкість рухомого складу;

$n_{дв max}$ – максимальні оберти електродвигуна;

ω – частота обертання електродвигуна.

При розрахунку та побудові гальмівної характеристики рухомого складу можна прийняти:

$$B_{max} = (1 - 1,2) F_{max}, \quad (11.16)$$

$$V_{гальм1} = V_{min}, \quad (11.17)$$

де B_{max} – максимальна сила гальмування;

$V_{гальм1}$ – мінімальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні.

Звідки максимальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_{\text{гальм2}} = 3,6 * n * P_{\text{дв}} / (B_{\text{max}} * \eta_{\text{ред}}). \quad (11.18)$$

Подальше формування гальмівної характеристики (при $V > V_{\text{гальм2}}$) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила гальмування дорівнює:

$$B = 3,6 * n * P_{\text{дв}} / (V * \eta_{\text{ред}}). \quad (11.19)$$

Гальмівний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{\text{гальм}} = B * \eta_{\text{ред}} * D_{\text{к}} / (2 * i_{\text{ред}}). \quad (11.20)$$

Механічні характеристики електроприводу у відносних одиницях наведені на рис. 11.1.

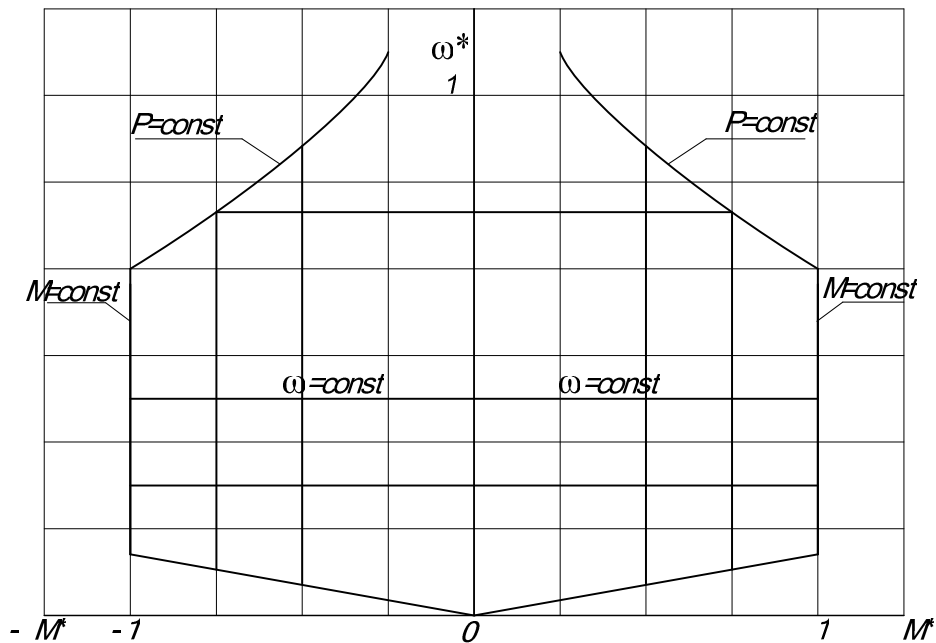


Рис. 11.1 – Механічні характеристики електроприводу

11.2 Структура мікропроцесорної системи

Розглянемо структуру мікропроцесорної системи керування асинхронного електроприводу. Мікропроцесорна система керування асинхронного електроприводу має два канали керування. У першому каналі на основі сигналів від датчиків напруги, струму та обертів електродвигуна формується сигнал керування напругою інвертора напруги, який забезпечує реалізацію законів керування:

$$U_1/f_1 = \text{const}, \quad (11.21)$$

для отримання незмінного моменту на валу електродвигуна;

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}, \quad (11.22)$$

для забезпечення незмінної потужності електроприводу;

$$V = \text{const}, \quad (11.23)$$

для забезпечення незмінної швидкості електроприводу.

В другому каналі на основі сигналу за обертами електродвигуна та заданим ковзанням формується сигнал керування частотою напруги статора:

$$f_1 = f_p + f_s, \quad (11.24)$$

де f_p – сигнал, пропорційний частоті ротора;

f_s – задане ковзання.

На рис. 11.2 наведена функціональна схема каналу керування напругою інвертора.

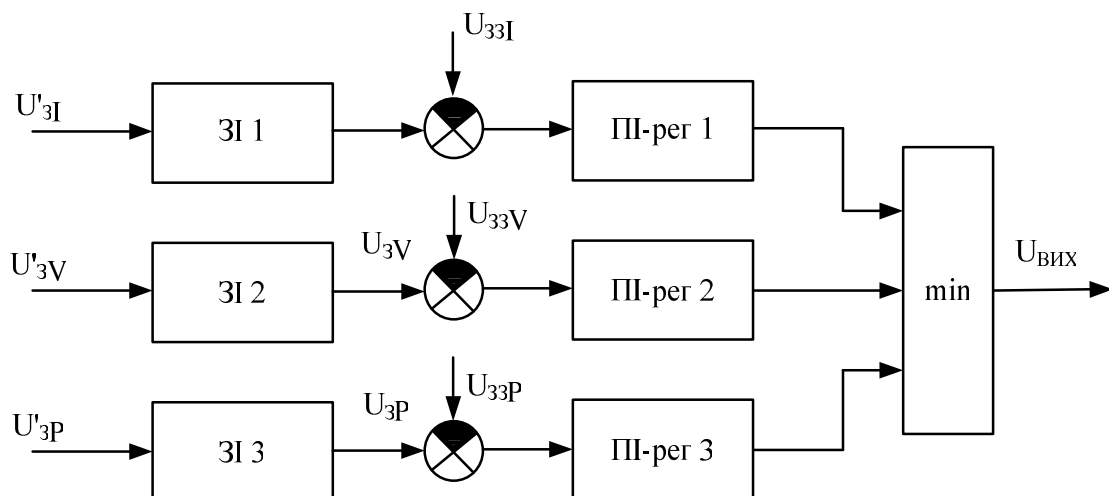


Рис. 11.2 – Функціональна схема каналу керування напругою інвертора

Для забезпечення формування механічної характеристики електроприводу, наведеної на рисунку 11.1, у каналі керування напругою інвертора необхідно передбачити три канали регулювання:

- струму;
- потужності;
- швидкості.

Кожний канал, в свою чергу, повинен мати задатчик інтенсивності ($3I_1$, $3I_2$, $3I_3$) та пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) або пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор). Задатчик інтенсивності служить для одержання необхідного закону зміни в часі сигналу керування, який задають.

Схемою мінімуму вибирають мінімальний із трьох вихідних сигналів регуляторів. Працює канал, у якого на виході регулятора – найменший сигнал.

Після подачі сигналу керування, у перший момент часу, зворотного зв'язку від датчиків немає, система регулювання – розімкнута. Зі зростанням зворотних зв'язків мікропроцесорна система керування забезпечує регулювання пускового струму та моменту (рис. 11.1). Тобто в пусковому режимі спочатку працює канал регулювання струму, а по мірі розгону електроприводу – здійснюється автоматичний перехід до каналу регулювання потужності або швидкості.

11.3 Елементи мікропроцесорної системи

Для формування сигналів завдання систем керування, що змінюються за заданим законом, служать задатчики інтенсивності ($3I$). Зокрема $3I$ використовують для забезпечення необхідної динаміки електроприводу в режимах пуску й гальмування.

Задатчик інтенсивності являє собою інтегратор (див. розділ 7) і є типовою ланкою автоматичної системи керування.

За певних умов і аперіодична ланка може бути інтегратором. Розглянемо електричний ланцюг RC, наведений на рис. 11.3, який є аперіодичною ланкою.

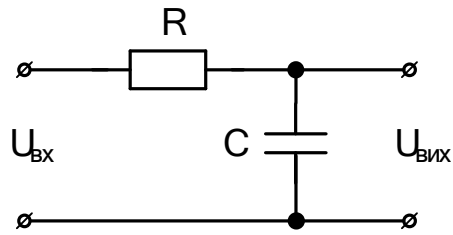


Рис. 11.3 – Схема RC-ланки

Її диференціальне рівняння й передаточна функція відповідно мають такий вигляд:

$$T \frac{du_{\text{вих.}}}{dt} + u_{\text{вих}} = u_{\text{вх}}, \quad (11.25)$$

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{1 + Tp}, \quad (11.26)$$

де T – постійна часу, що дорівнює:

$$T = RC. \quad (11.27)$$

Перехідну функцію 2 ланки RC на інтервалі $0 < t < t_1$ приблизно можна замінити дотичною до експоненти (рис. 11.4).

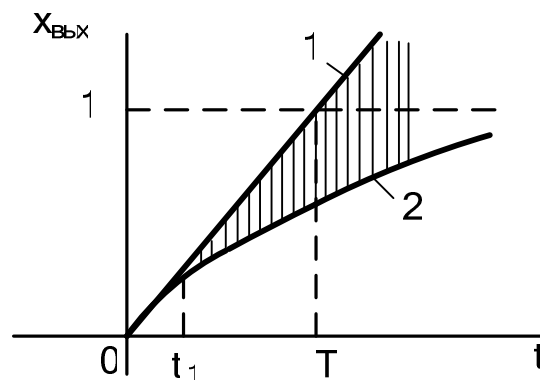


Рис. 11.4 – Перехідна функція аперіодичної ланки

Це означає, що ланку RC у цьому випадку можна вважати інтегруючою. Максимальний час інтеграції t_1 має бути значно менший постійної часу T . Що більше

постійна часу, то більшим можна припустити інтервал інтеграції без істотних похибок.

Розглянутий ланцюг RC можна використовувати для плавного зростання сигналу завдання системи керування.

На рис. 11.5 наведена структурна схема ПІ-регулятора, який складається з пропорційного та інтегрального регуляторів, включених паралельно. ПІ-регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної та інтегральної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{\text{вих}}(p) = (K_p + K_i/p) * U_{\text{вх}}(p), \quad (11.28)$$

$$K_i = 1/ T_i \quad (11.29)$$

де K_p – коефіцієнт посилення регулятора;

T_i – постійна часу інтегрування.

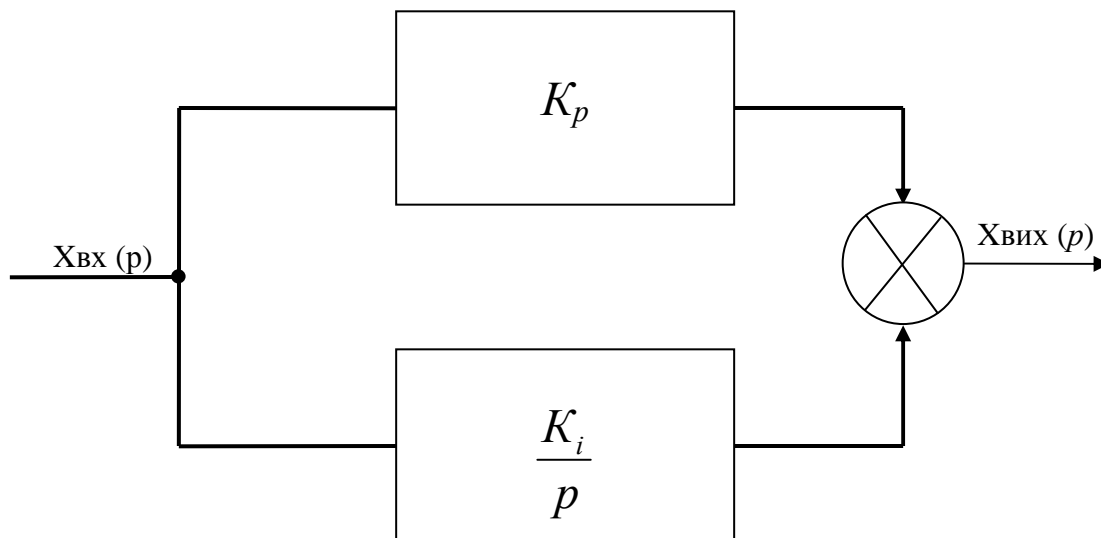


Рис. 11.5 – Структурна схема ПІ-регулятора

На рис. 11.6 наведена структурна схема ПД-регулятора.

ПД-регулятор складається з пропорційного, інтегрального та диференціального регуляторів, включених паралельно.

ПД-регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної, інтегральної та диференціальної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{\text{вих}}(p) = (K_p + K_i/p + T_d * p) * U_{\text{вх}}(p), \quad (11.30)$$

де T_d – постійна часу диференціювання.

Складові ПД-регулятора можна розглянути, використовуючи операційні підсилювачі.

На рис. 11.7 наведено схему підсилювача напруги з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати пропорційний регулятор.

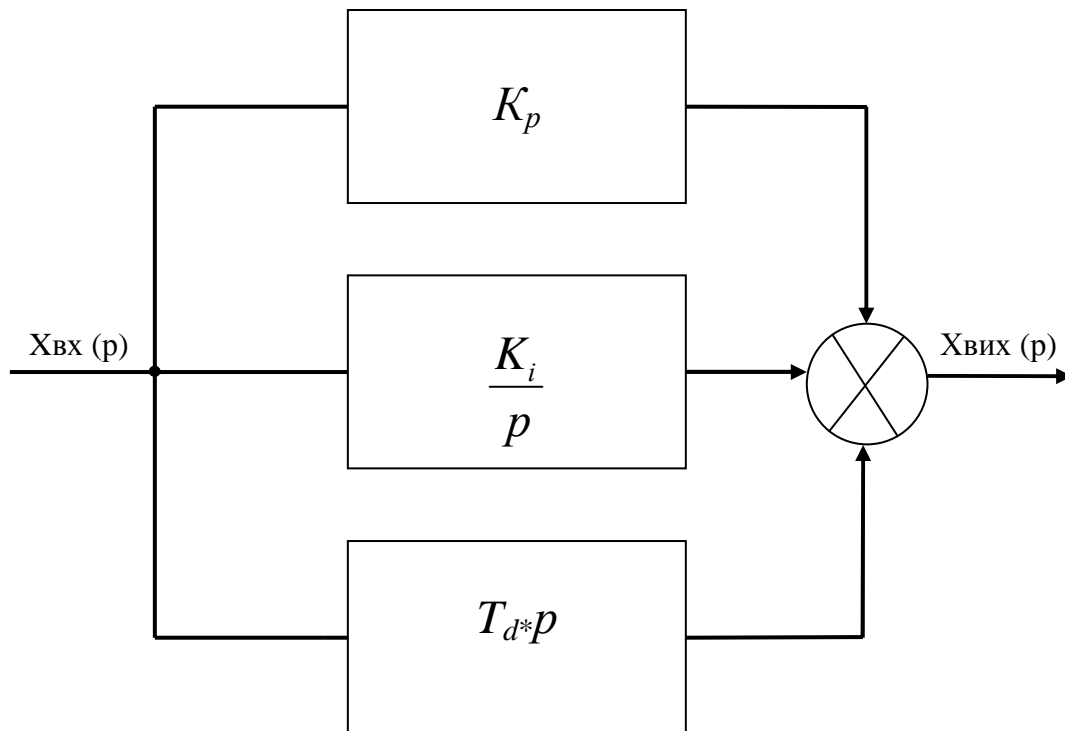


Рис. 11.6 – Структурна схема ПД-регулятора

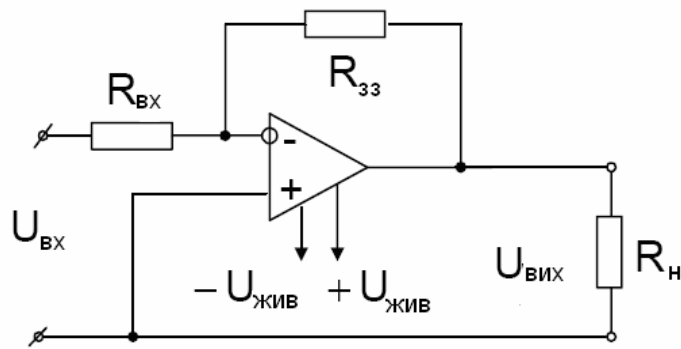


Рис. 11.7 – Підсилювач напруги

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{ВІХ}} = - (R_{\text{ЗЗ}} / R_{\text{ВХ}}) * U_{\text{ВХ}}, \quad (11.31)$$

або

$$U_{\text{ВІХ}} = - K * U_{\text{ВХ}}, \quad (11.32)$$

де $R_{\text{ЗЗ}}$ – опір резистора зворотного зв'язку;

$R_{\text{ВХ}}$ – опір вхідного резистора;

K – коефіцієнт підсилення.

На рис. 11.8 наведено схему інтегрального підсилювача з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати інтегральний регулятор.

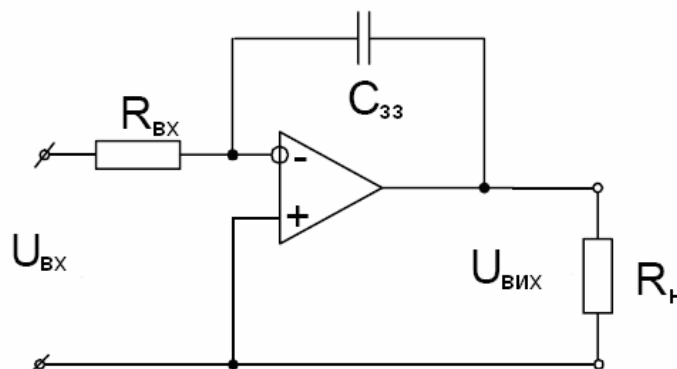


Рис. 11.8 – Інтегральний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - (1 / (R_{\text{вх}} * C_{\text{зз}})) \int U_{\text{вх}} * dt. \quad (11.33)$$

На рис. 11.9 наведено схему диференціального підсилювача з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати диференціальний регулятор.

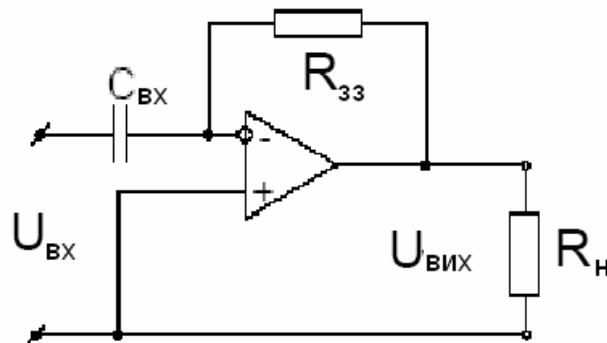


Рис. 11.9 – Диференціальний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - R_{\text{вх}} * C_{\text{зз}} * dU_{\text{вх}} / dt. \quad (11.34)$$

Вказаний вище задатчик інтенсивності можна представити аперіодичним елементом:

$$U_{\text{вих}}(p) = (1 / (T_{\text{зі}} * p + 1)) * U_{\text{вх}}(p) \quad (11.35)$$

де $T_{\text{зі}}$ – постійна часу задатчика інтенсивності.

Контрольні запитання

1. Що називається задатчиком інтенсивності?
2. Які властивості має задатчик інтенсивності?
3. Яким чином можна регулювати величину вихідного сигналу задатчика інтенсивності?
4. Яке місце займає МПСК у структурі системи керування тягового асинхронного електроприводу?

5. Який канал МПСК забезпечує реалізацію необхідних законів керування електроприводом?
6. Які елементи входять до складу МПСК?
7. Які закони керування забезпечують формування механічної характеристики електроприводу?
8. Які типи регуляторів ви знаєте?

12. Цифрові канали зв'язку

12.1 Характеристики цифрових каналів зв'язку

У цифрових каналах зв'язку використовують CAN – протокол, що був розроблений фірмою Robert Bosch GmbH для автомобільної промисловості.

CAN – протокол відрізняється підвищеною перешкодостійкістю, надійністю і має такі властивості:

- дозволяє отримувати повідомлення всіма вузлами з синхронізацією в часі;
- забезпечує арбітраж доступу до шини;
- виявляє похибки і передає сигнали щодо них;
- забезпечує автоматичну передачу повідомлень при отриманні можливості повторного доступу до шини;
- розрізняє випадкові похибки від постійних відмов;
- забезпечує роботу по витій парі на відстані до 1 км.

Усі ці якості роблять CAN – протокол доволі привабливим для використання при розробці нових проектів. Тим більше, що ряд фірм випускають недорогі контролери, котрі апаратно реалізують вимоги CAN – протоколу і працюють у широкому температурному діапазоні.

CAN – протокол має наступні рівні:

- об’єктний рівень, що забезпечує фільтрацію та обробку повідомлень і стану;
- транспортний рівень, що представляє собою ядро CAN – протоколу. Він відповідає за синхронізацію, арбітраж, доступ до шини, розподіл посилок на фрейми, визначення й передачу похибок і мінімізацію несправностей;
- фізичний рівень визначає, як саме будуть передаватися сигнали, їх електричні рівні й швидкість передачі.

Фізичний рівень визначають стандартом ISO 11898.

Диференційне вмикання прийомопередавачів забезпечує затухання синфазної перешкоди. При цьому рівень сигналів складає третину від значення напруги живлення. Саму напругу живлення не визначають жорстко.

Наприклад, типові значення сигнальних рівнів у CAN – шині при напрузі живлення +5В наведені на рис. 12.1, причому домінуючим рівнем є нижчий рівень, а рецесивним, відповідно, верхній.

Максимальна відстань між вузлами – до 1 км.

Швидкість обміну – до 1 Мбіт/с при довжині лінії 60 м.

Можливість використання гальванічної розв’язки, причому гальванічна розв’язка може встановлюватися або між прийомопередаючим буфером і мікросхемою, яка забезпечує функції CAN, або між мікросхемою і іншою системою (рис. 12.2).

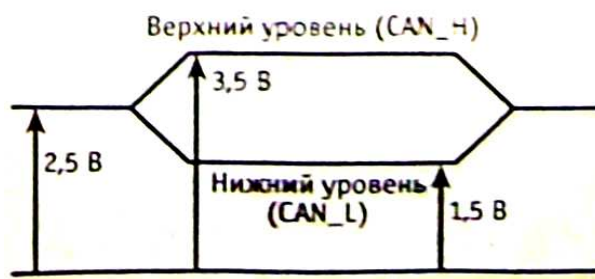


Рис. 12.1 – Типові значення сигнальних рівнів у CAN – шині

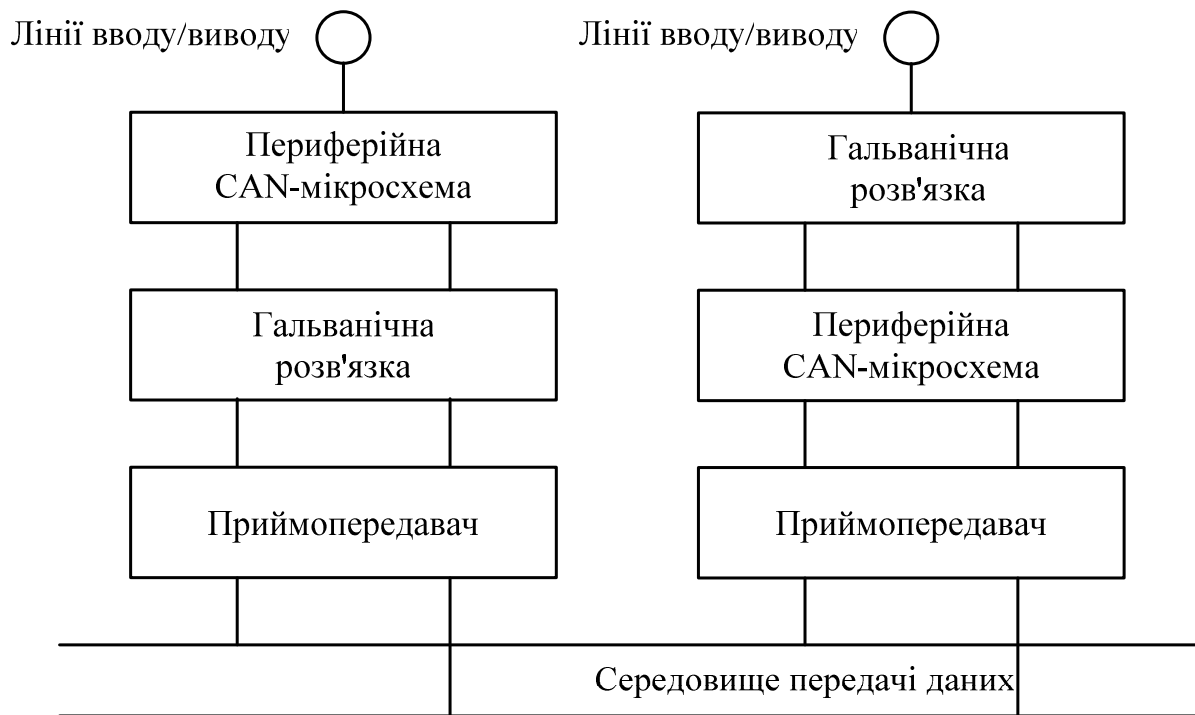


Рис. 12.2 – Два типи гальванічної розв'язки

12.2 Протоколи обміну

Для створення CAN – протоколу необхідно розробити протокол обміну між Master і Slave.

Приклад такого протоколу обміну між пультом керування (ПК) та мікропроцесорною системою керування (МПСК) наведений у табл. 12.1. Аналогічний вигляд має протокол обміну між МПСК та системою керування інвертора напруги (СКІН).

**Таблиця 12.1 – Протокол обміну між пультом керування
та мікропроцесорною системою керування**

№ п/п	Параметр	Одиниця виміру	Інформаційний зміст	Джерело
1	2	3	4	5
1.	I_{ϕ}	1 байт	Діюче значення струму	МПСК
2.	V	1 байт	Швидкість об'єкту	МПСК
3.	P	1 байт	Потужність електроприводу	МПСК
4.	I_d	1 байт	Активний струм на вході інвертора напруги	МПСК
5.	U_d	1 байт	Напруга мережі живлення	МПСК
6.	$N_{\text{км}}$	4 біт	Номер позиції контролера	ПК
7.	$F_{\text{рух}}$	1 біт	Режим «Рух»	ПК
8.	$F_{\text{гальм}}$	1 біт	Режим «Гальмування»	ПК
9.	$F_{\text{вибіг}}$	1 біт	Режим «Вибіг»	ПК
10.	F_v	1 біт	Рух «Вперед»	ПК
11.	F_n	1 біт	Рух «Назад»	ПК
12.	$F_{\text{ін}}$	1 біт	Команда на включення інвертора напруги	ПК

Контрольні запитання

1. Де використовують CAN – протокол?
2. Які характеристики роблять CAN – протокол привабливим для використання при розробці нових проектів?
3. Які типові значення сигнальних рівнів у CAN – шині при напрузі живлення +5 В?
4. Який із сигнальних рівнів є домінуючим у CAN – шині?
5. Яка максимальна відстань між вузлами при передачі інформації?
6. Яка швидкість обміну у CAN – шині при довжині лінії 60 м?
7. Скільки сигнальних рівнів у CAN – шині?
8. Які сигнали поступають із пульта керування?
9. Які сигнали поступають із МПСК?
10. Звідки задаються режими роботи електроприводу?
11. Які одиниці виміру дискретних сигналів?
12. Які одиниці виміру аналогових сигналів?
13. Які сигнали поступають до ПК?
14. Куди поступають дискретні сигнали?

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навчальний посібник / © М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепіков та ін.; за ред.. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : «Либідь», 2005. – 680 с.
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. – К. : Либідь, 1997. – 544 с.
3. Беседы по автоматике/ Голубничий Н. И.,Зайцев Г. Ф. и др. – К. : «Техніка», 1973. – 236 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ШПІКА Микола Іванович

Конспект лекцій
з дисципліни

"СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ"

*(для студентів 3 і 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки
0922 (6.050702) – «Електромеханіка»
спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)*

Відповідальний за випуск *В. Х. Далека*

Редактор *О. Ю. Кригіна*

Комп'ютерне верстання

План 2010, поз. 81Л

Підп. до друку 28.12.2010 р.

Формат 60 x 84 /16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 3,2

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12. 05. 2011р.