

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

ДО ВИКОНАННЯ
розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2023

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Системи керування електроприводами» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : С. О. Закурдай, В. А. Герасименко, М. І. Шпіка. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 38 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. С. О. Закурдай,
канд. техн. наук, ст. викл. В. А. Герасименко,
канд. техн. наук, доц. М. І. Шпіка

Рецензент

В. Ф. Харченко, доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол №9
від 26 листопада 2019 р.*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Вибір структурної схеми електроприводу.....	8
2 Розрахунок статичних характеристик електроприводу.....	10
3 Структура системи керування	14
4 Опис роботи системи керування.....	16
5 Вибір регуляторів та розрахунок параметрів зворотних зв'язків.....	17
6 Алгоритми системи керування	23
7 Цифрові канали зв'язку	25
8 Елементи системи керування	27
Список використаних джерел	34
Додаток А	36

ВСТУП

Мета розрахунково-графічної роботи

Сучасний електропривод становить автоматизовану систему, що складається з електродвигуна, силового перетворювача та мікропроцесорної системи керування. Він забезпечує перетворення електричної енергії в механічну відповідно до заданого алгоритму. Сфера застосування електричного приводу в промисловості, на транспорті та в побуті постійно розширюється. В даний час більше 60% всієї виробленої у світі електричної енергії споживають електричні двигуни. Звідси й можна зробити висновок, що ефективність енергозберігаючих технологій значною мірою визначають ефективністю електропривода. Розробка високопродуктивних, компактних й економічних систем приводу є пріоритетним напрямком розвитку сучасної техніки.

Аналіз продукції провідних світових виробників систем електроприводу дозволяє зробити висновок, що неухильно зростає частка систем приводу з двигунами змінного струму. У більшості таких електроприводів використовують асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором. Це пов'язано, в першу чергу, з низькою надійністю щітково-колекторного вузла двигунів постійного струму й більш високою їх вартістю в порівнянні із двигунами змінного струму, а також у зв'язку зі значним зниженням цін на статичні перетворювачі частоти.

Ріст ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці й перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів з вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв, зробили необоротною тенденцією масової заміни аналогових систем керування приводами на системи прямого цифрового керування.

Задані характеристики електроприводу підтримуються мікропроцесорною системою керування на протязі всього терміну роботи, а, при необхідності, можуть корегуватись шляхом вдосконалення 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.

Система керування, яка запропонована для розрахунку, призначена для реалізації режимів роботи тягового асинхронного електроприводу. Систему керування виконують на мікроконтролерах з використанням цифрових каналів зв'язку між пультом керування, мікропроцесорною системою керування та системою керування інвертора напруги.

Використання цифрових каналів зв'язку дозволяє підвищити надійність передачі інформації, а застосування мікроконтролерів – забезпечує високу точність регулювання заданих параметрів.

Мета розрахунково-графічної роботи – привити студентам навички системного підходу при проектуванні сучасної багаторівневої мікропроцесорної системи керування асинхронного електроприводу з кількома інверторами напруги та асинхронними короткозамкнутими електродвигунами. Тому перед студентами ставиться завдання не просто освоїти методику розрахунку тих чи інших схемних рішень або ланцюгів керування, (наприклад, перетворювача частоти), а на основі технічних вимог та вихідних даних вибрати структуру електроприводу, зробити розрахунок його статичних характеристик та вибрати закони керування, розробити структуру багаторівневої мікропроцесорної системи керування та здійснити вибір її елементів, провести розрахунок параметрів зворотних зв'язків та вибір регуляторів, розробити протоколи обміну цифрових каналів зв'язку та алгоритми керування, зробити опис роботи системи керування. Причому, студенти повинні обґрунтовувати свій вибір технічних рішень.

Завдання для розрахунково-графічної роботи

В якості об'єкту керування обирається асинхронний електродвигун тягового електроприводу транспортного засобу міського електротранспорту.

До вихідних даних входять:

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

n – кількість електродвигунів електроприводу;

$i_{\text{ред}}$ – передавальне число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – ККД редуктора;

m – приведена маса транспортного засобу;

V_{max} – максимальна швидкість транспортного засобу;

G – вага транспортного засобу;

a_{max} – максимальне прискорення транспортного засобу;

W – сила опору руху транспортного засобу;

$D_{\text{к}}$ – діаметр колеса;

$U_{\text{д}}$ – напруга живильної мережі;

$\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора;

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД тягового асинхронного електродвигуна;

$I_{\text{ф}}$ – діюче значення струму тягового асинхронного електродвигуна;

$Z_{\text{рот}}$ – кількість зубів ротора для давачів імпульсів.

В розрахунково-графічній роботі необхідно:

– на основі технічних вимог та вихідних даних зробити вибір структури тягового асинхронного електропривода;

– зробити розрахунок статичних характеристик електропривода та вибрати закони керування;

– розробити структуру багаторівневої мікропроцесорної системи керування та здійснити вибір її елементів;

– провести розрахунок параметрів зворотних зв'язків та вибір регуляторів;

– розробити протоколи обміну цифрових каналів зв'язку та алгоритми керування;

– зробити опис роботи системи керування.

Оформлення розрахунково-графічної роботи проводять відповідно до вимог ЄСКД і нормативних документів з оформлення.

Технічні вимоги до системи керування

Система керування призначена для роботи в складі асинхронного електроприводу. Система керування повинна виконуватись на основі мікроконтролерів та забезпечувати наступні режими роботи електроприводу: рух, вибіг та гальмування.

Система керування повинна формувати наступні характеристики електроприводу:

- постійної сили (моменту);
- постійної потужності;
- постійної швидкості (частоти обертання).

Система керування повинна забезпечити діапазон регулювання:

- швидкості від нульової до V_{\max} ;
- прискорення від нульового до a_{\max} .

Зв'язок між пультом керування, мікропроцесорною системою керування та системами керування інверторами напруги повинен здійснюватися цифровими каналами зв'язку.

Система керування повинна забезпечувати:

- високу надійність роботи електроприводу;
- діагностику роботи електроприводу;
- відображення на пульті керування основних параметрів електроприводу

та систем його захисту.

Пульт керування, мікропроцесорна система керування та системи керування інверторами напруги повинні постачатись від бортової мережі живлення.

1 ВИБІР СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для прикладу розглянемо тяговий електропривод з 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 рисунку 1.1 наведена структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги для усіх тягових електродвигунів.

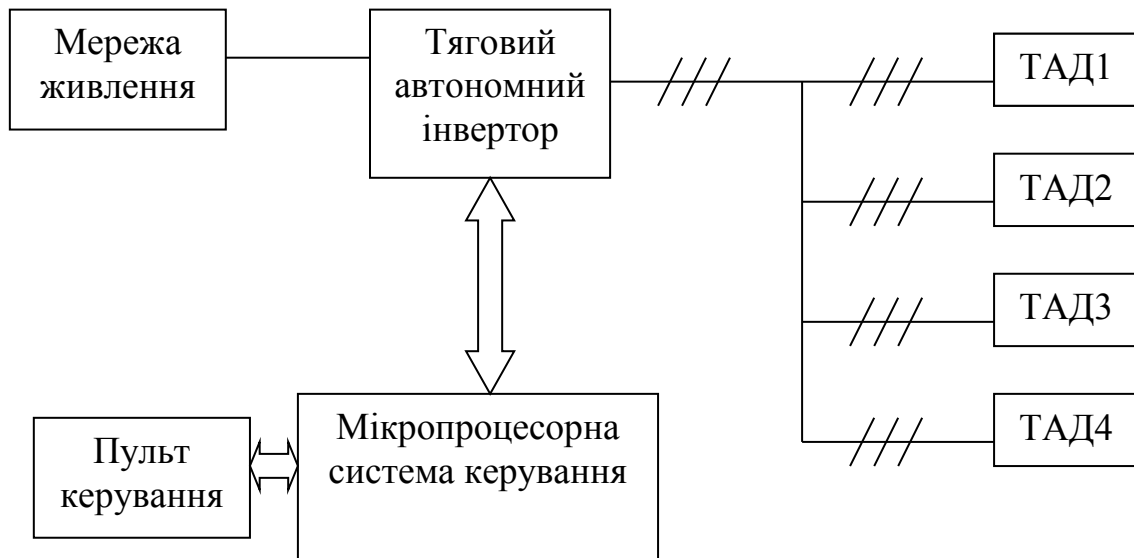


Рисунок 1.1 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги

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 знайшла широкого використання в якості тягового.

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 тягових електродвигуни. Така схема наведена на рисунку 1.2 .

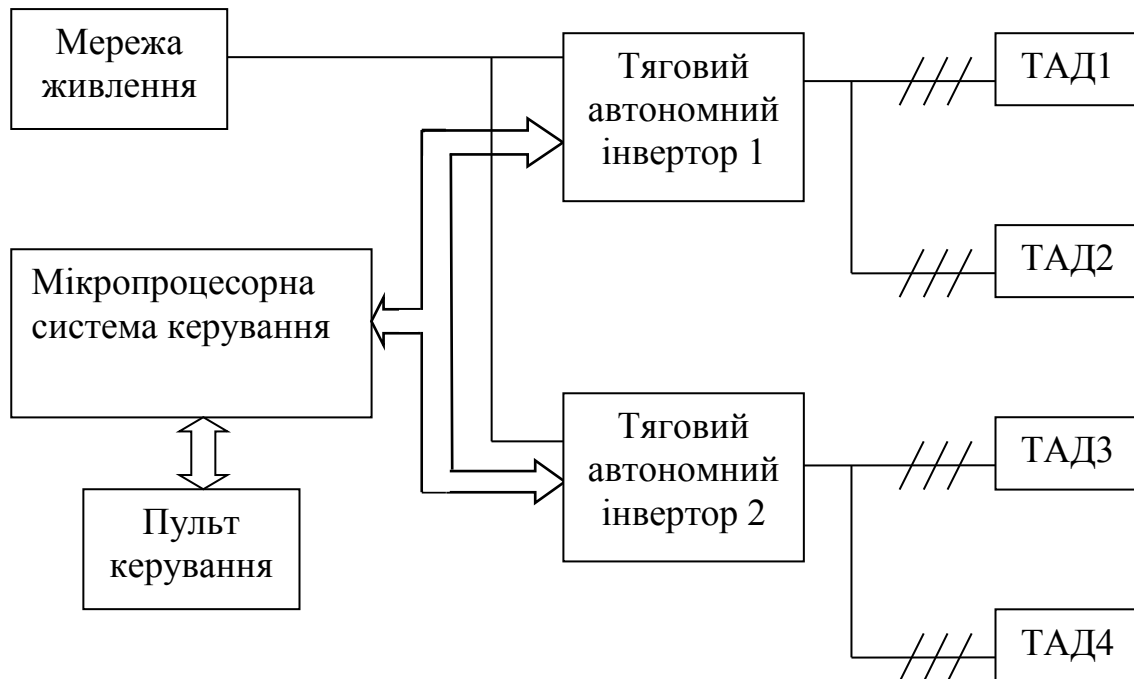


Рисунок 1.2 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги на два електродвигуни

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 електродвигун (рис. 1.3). 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.

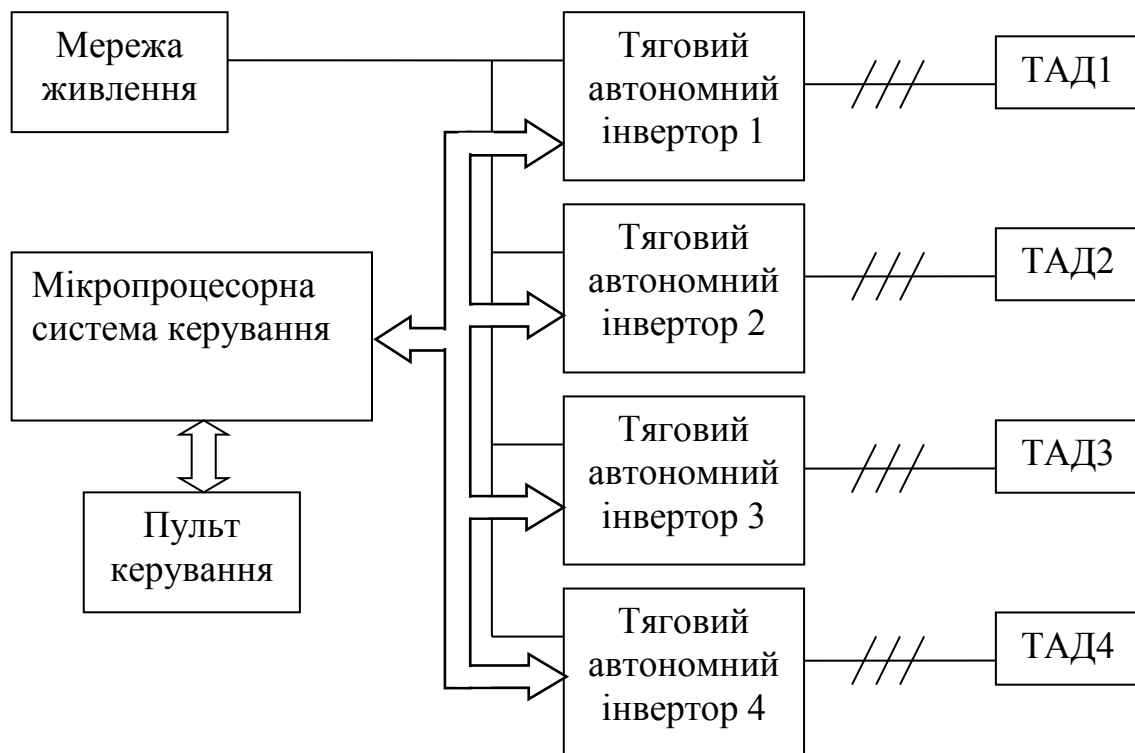


Рисунок 1.3 – Структурна схема електроприводу з індивідуальними автономними інверторами напруги

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

2 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Статичні характеристики електроприводу для тягового та гальмівного режимів можна розрахувати, використовуючи основні положення теорії електричної тяги. При розрахунках всі розмірності приводити в системі СІ.

Сила тяги витрачається на подолання сили опору руху транспортного засобу та забезпечення йому заданого прискорення:

$$F = m \cdot a + W, \quad (2.1)$$

де m – приведена маса транспортного засобу;

a – задане прискорення транспортного засобу;

W – сила опору руху транспортного засобу.

Максимальна сила тяги дорівнює:

$$F_{max} = m \cdot a_{max} + W, \quad (2.2)$$

де a_{max} – максимальне прискорення транспортного засобу.

Потужність електроприводу дорівнює:

$$P = P_{пит} \cdot G, \quad (2.3)$$

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

G – вага транспортного засобу.

Потужність тягового електродвигуна:

$$P_{дв} = \frac{P}{n}, \quad (2.4)$$

де n – кількість електродвигунів електроприводу.

Мінімальну швидкість руху транспортного засобу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні можна прийняти рівною:

$$V_1 = V_{min}, \quad (2.5)$$

де $V_{min} = 5$ км/год.

Максимальна швидкість транспортного засобу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_2 = \frac{3,6 \cdot n \cdot P_{дв} \cdot \eta_{ред}}{F_{max}}, \quad (2.6)$$

де $\eta_{ред}$ – ККД редуктора.

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

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const.} \quad (2.7)$$

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

$$F = \frac{3,6 \cdot n \cdot P_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{V}. \quad (2.8)$$

Для забезпечення незмінної потужності електроприводу треба дотримуватись закону керування:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}. \quad (2.9)$$

Для забезпечення незмінної швидкості транспортного засобу потрібно дотримуватись закону керування:

$$V = \text{const}. \quad (2.10)$$

На основі (2.5), (2.6) та (2.8) можна розрахувати та побудувати граничну тягову характеристику.

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

$$M = \frac{F \cdot D_{\text{к}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ред}}}, \quad (2.11)$$

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot i_{\text{ред}} \cdot V}{3,6 \cdot \pi \cdot D_{\text{к}}}, \quad (2.12)$$

$$M = \frac{P_{\text{дв}} \cdot \pi \cdot n_{\text{дв}}}{30}, \quad (2.13)$$

$$i_{\text{ред}} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot D_{\text{к}} \cdot n_{\text{дв}} \text{ max}}{60 \cdot V_{\text{max}}}, \quad (2.14)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{дв}}}{60}, \quad (2.15)$$

де D_k – діаметр колеса;

$i_{ред}$ – передавальне число редуктора;

V_{max} – максимальна швидкість транспортного засобу;

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

ω – частота обертання електродвигуна.

При розрахунку та побудові гальмівної характеристики транспортного засобу можна прийняти:

$$B_{max} = (1 \dots 1,2) F_{max}, \quad (2.16)$$

$$V_{гальм1} = V_{min}, \quad (2.17)$$

де B_{max} – максимальна сила гальмування;

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

Звідки максимальна швидкість руху транспортного засобу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_{гальм2} = \frac{3,6 \cdot n \cdot P_{дв}}{B_{max} \cdot \eta_{ред}}. \quad (2.18)$$

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

$$B = \frac{3,6 \cdot n \cdot P_{дв}}{V \cdot \eta_{ред}}. \quad (2.19)$$

Гальмівний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{гальм} = \frac{B \cdot \eta_{ред} \cdot D_k}{2 \cdot i_{ред}}. \quad (2.20)$$

Механічні характеристики електроприводу у відносних одиницях наведені на рисунку 2.1.

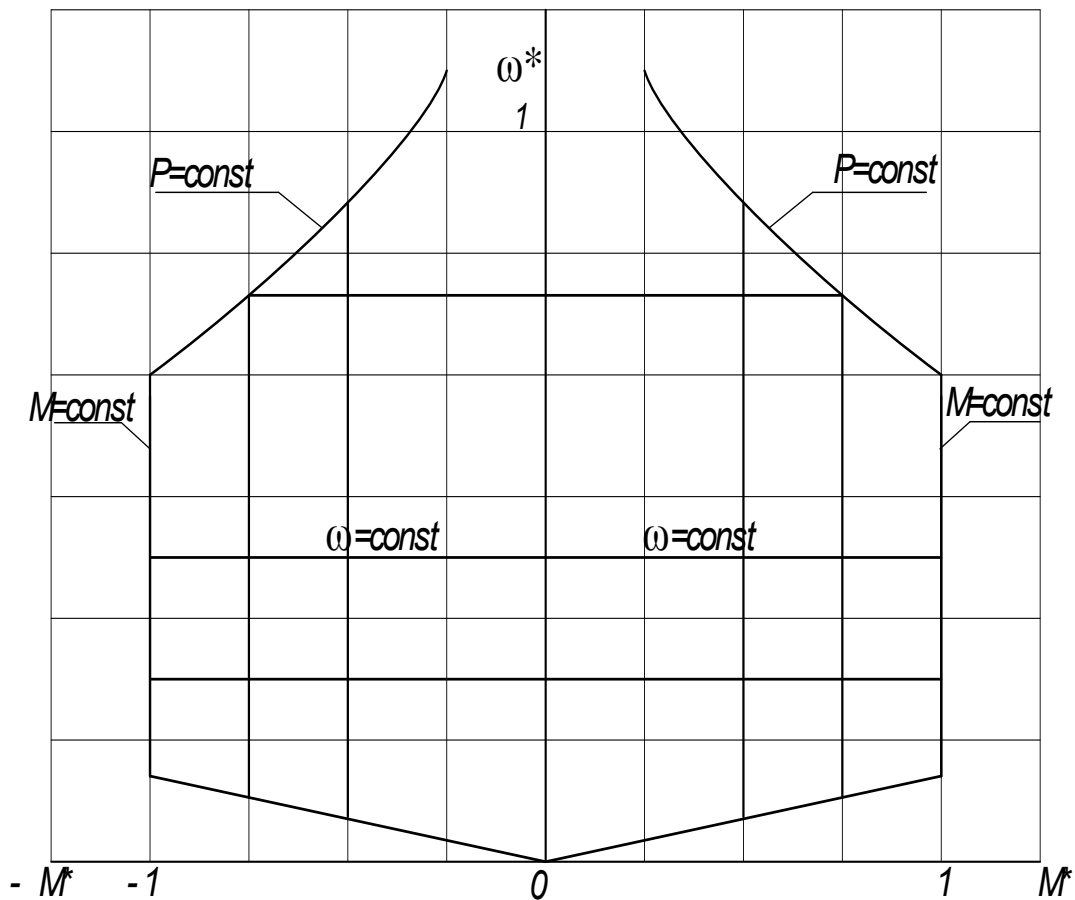


Рисунок 2.1 – Механічні характеристики електроприводу

3 СКЛАДАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Для прикладу розглянемо структурну схему системи керування асинхронним електроприводом з одним електродвигуном (див. рис. 3.1).

До складу системи керування електроприводом входять:

- пульт керування;
- мікропроцесорна система керування;
- системи керування інвертором напруги;
- давач постійної напруги;
- давач постійного струму;
- давачі змінного струму за числом фаз;

- давач обертів електродвигуна;
- монітор.

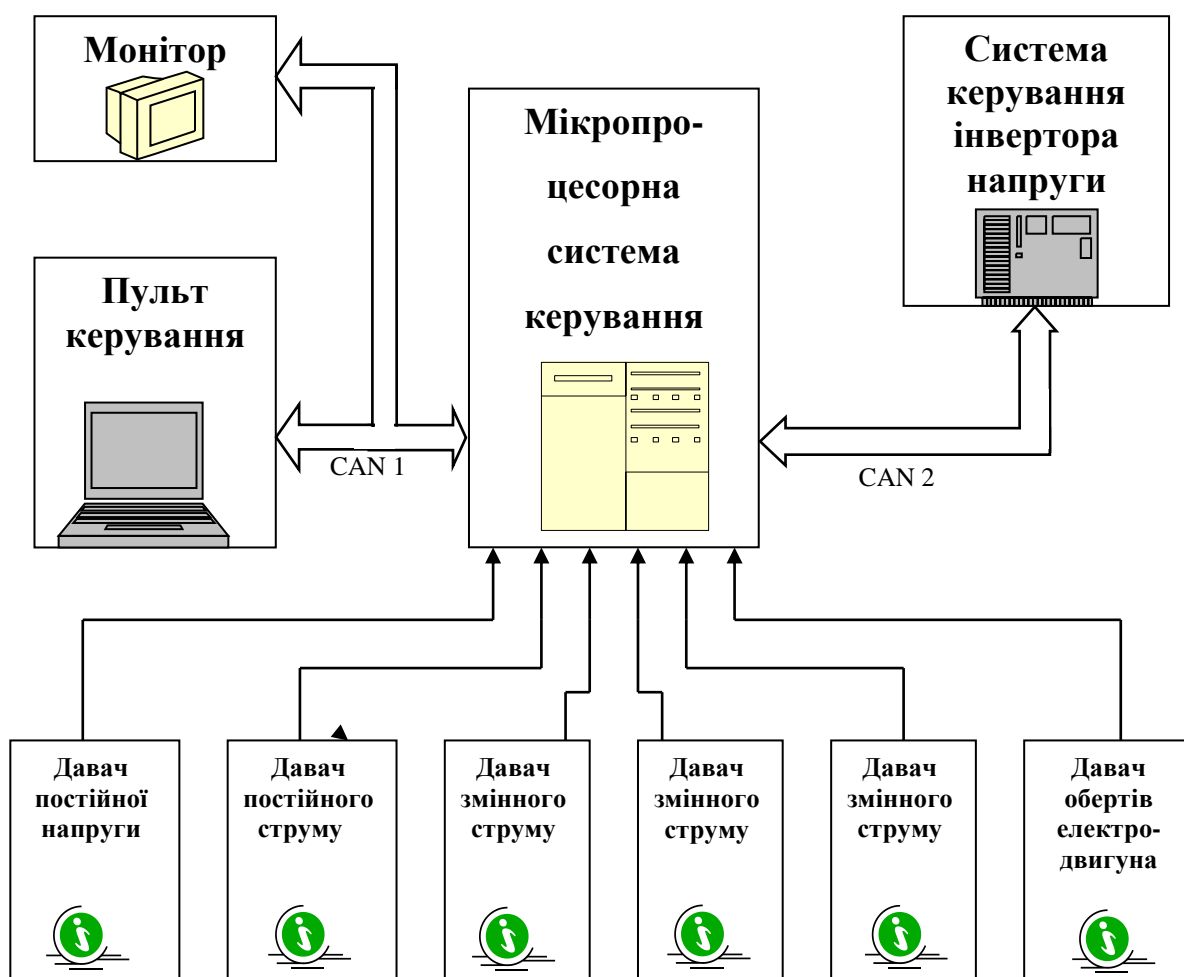


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування

Система керування асинхронним електроприводом підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має пульт керування. На другому рівні знаходиться мікропроцесорна система керування. Системи керування інвертора напруги має найнижчий третій рівень. Це умовно позначається таким чином: пульт керування – Master для мікропроцесорної системи керування, а вона для нього – Slave. В 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.

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

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

Давач обертів електродвигуна необхідний для частотного каналу.

Монітор відображає режим роботи електроприводу.

4 ОПИС РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Основні вимоги, які необхідно враховувати при описі роботи системи керування електроприводом, наведені нижче.

Перш за все необхідно привести систему керування в робочий стан, задати напрям руху, режим роботи та інтенсивність розгону електроприводу.

Для заборони несанкціонованого включення системи керування, на пульті керування треба передбачити ключ. Після його включення оператор має можливість перевести систему керування в робочий стан та забезпечити режим електроприводу «Рух».

Режим «Рух» треба здійснювати з пульту керування за допомогою контролера керування. Для переходу в режим «Рух» необхідно встановити реверсор в положення «Вперед» («Назад») та перевести контролер керування в одне з тягових положень.

Для переходу в режим «Вибіг» контролер керування на пульті встановлюють у нейтральне положення.

Для забезпечення режиму «Гальмування», контролер керування переводять на одну з гальмівних позицій.

Для реверсування електроприводу необхідно виконати такі умови:

- двигун повністю зупинити;
- контролер керування перевести в нейтральне положення.

Після виконання цих умов реверсивну рукоятку переводять із стану «Вперед» в стан « Назад » або навпаки.

Для підтримання швидкості перемикач «Швидкість» встановлюють в одне з положень, що відповідає потрібній швидкості. Швидкість може підтримуватися в діапазоні 0...60 км/год. При максимальному положенні перемикача «Швидкість» – канал регулювання швидкості не працює.

Алгоритми керування повинні передбачати автоматичний процес збору електричної схеми для заданого режиму та регулювання параметрів за заданим законом.

5 ВИБІР РЕГУЛЯТОРІВ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

Вибір регуляторів та розрахунок параметрів зворотних зв'язків розглянемо на прикладі регулятора напруги інвертора.

На рисунку 5.1 наведена функціональна схема регулятора напруги інвертора.

Для забезпечення формування механічної характеристики електроприводу, наведеної на рисунку 2.1, в регуляторі напруги інвертора необхідно передбачити три канали регулювання:

- струму;
- потужності;
- швидкості.

Кожний канал, в свою чергу, повинен мати задавач інтенсивності (ЗІ1, ЗІ2, ЗІ3) та пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) або пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД- регулятор).

Давач інтенсивності служить для одержання необхідного закону зміни в часі сигналу керування, який задають.

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

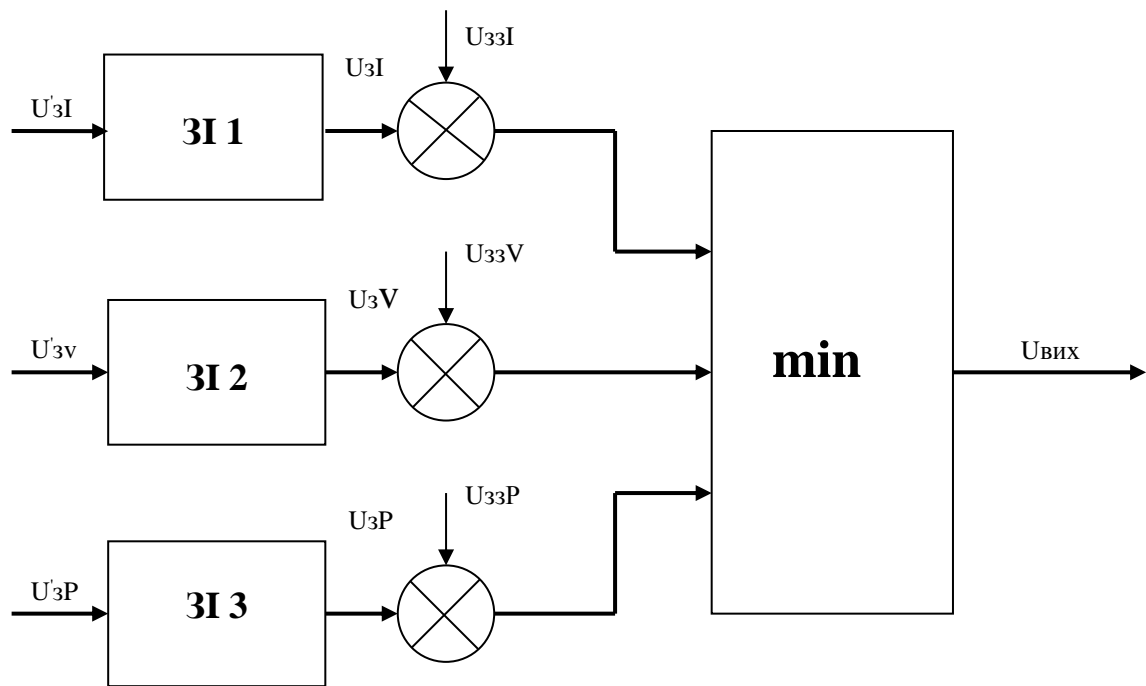


Рисунок 5.1 – Функціональна схема регулятора напруги інвертора

Після подачі сигналу керування, в перший момент часу, зворотний зв'язок від датчиків – відсутній, система регулювання – розімкнута. Зі зростанням зворотних зв'язків мікропроцесорна система керування забезпечує регулювання пускового струму та моменту (див. рис. 5.1). Тобто, в пусковому режимі спочатку працює канал регулювання струму, а по мірі розгону електроприводу – здійснюється автоматичний перехід в канал регулювання потужності або швидкості.

На рисунку 5.2 наведена структурна схема ПІ-регулятора.

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

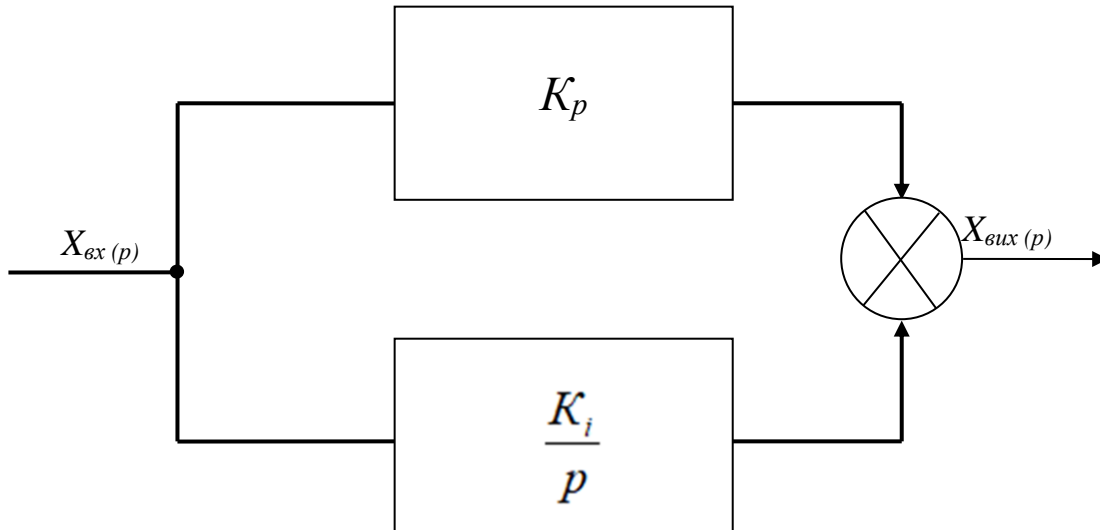


Рисунок 5.2 – Структурна схема ПІ- регулятора

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

$$U_{\text{вих}(p)} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \cdot U_{\text{вх}(p)}, \quad (5.1)$$

$$K_i = \frac{1}{T_i}, \quad (5.2)$$

де K_p – коефіцієнт посилення регулятора;
 T_i – постійна часу інтегрування.

На рисунку 5.3 наведена структурна схема ПІД-регулятора.

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

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

$$U_{\text{вих}(p)} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} + T_d \cdot p \right) \cdot U_{\text{вх}(p)}, \quad (5.3)$$

де T_d – постійна часу диференціювання.

Складові ПІД-регулятора можна розглянути, використовуючи операційні підсилювачі.

На рисунку 5.4 наведено підсилювач напруги з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати пропорційний регулятор.

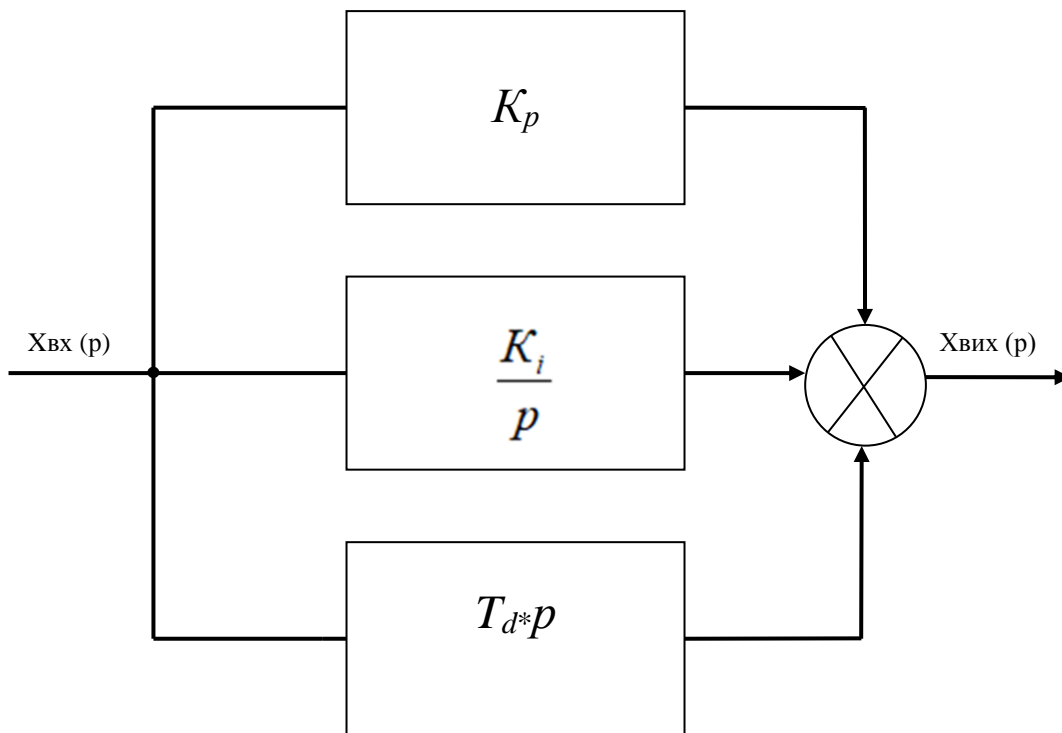


Рисунок 5.3 – Структурна схема ПІД- регулятора

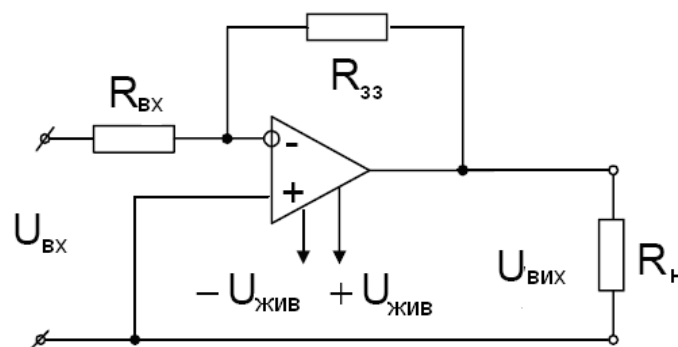


Рисунок 5.4 – Підсилювач напруги

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - \frac{R_{33}}{R_{\text{вх}}} \cdot U_{\text{вх}}, \quad (5.4)$$

або

$$U_{\text{ВИХ}} = - K \cdot U_{\text{ВХ}}, \quad (5.5)$$

де R_{33} – опір резистора зворотного зв'язку;

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

K – коефіцієнт підсилення.

На рисунку 5.5 наведено інтегральний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати інтегральний регулятор.

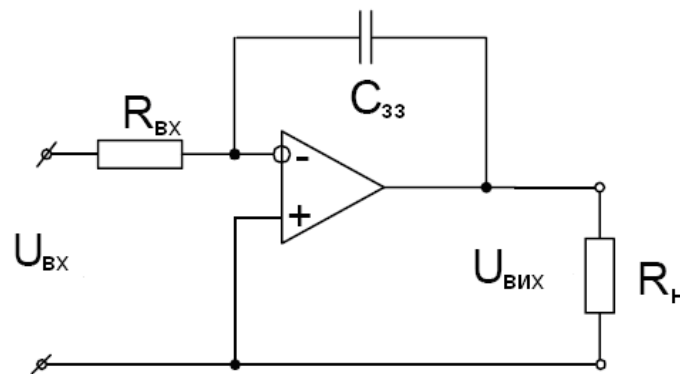


Рисунок 5.5 – Інтегральний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{ВИХ}} = - \left(\frac{1}{R_{\text{ВХ}} \cdot C_{33}} \right) \int U_{\text{ВХ}} \cdot dt. \quad (5.6)$$

На рисунку 5.6 наведено диференціальний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати диференціальний регулятор.

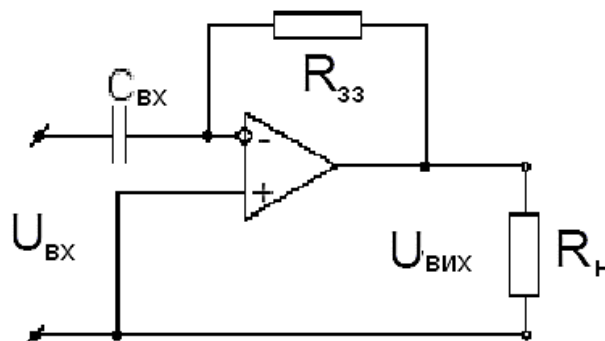


Рисунок 5.6 – Диференціальний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{зз}} \cdot \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}. \quad (5.7)$$

Вказаний вище давач інтенсивності можна представити аперіодичним елементом:

$$U_{\text{вих}}(p) = \frac{1}{T_{\text{зі}} \cdot p + 1} \cdot U_{\text{вх}}(p) \quad (5.8)$$

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

Для розрахунку параметрів зворотних зв'язків необхідно вибрати давачі напруги, струму, частоти обертання електродвигуна. Наприклад, для вимірювання напруги можна використовувати вимірювальний перетворювач напруги типу ПИНТ-1, для вимірювання струму – шунт на потрібний струм зі стандартним виходом 75мВ з вимірювальним перетворювачем напруги типу ПИНТ-1. Для вимірювання частоти обертання електродвигуна можна використовувати давачі типу НІА фірми HEINZMANN або типу КМГ-2Н фірми «Красс Маффай».

Якщо необхідно вимірювати напругу мережі живлення U_d , то використовують вхід вимірювального перетворювача напруги на 1000 В і вихід на 5 В.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за напругою буде дорівнювати:

$$K_{Ud} = \frac{U_{\text{вих1}}}{U_{\text{вх3}}} \quad (5.9)$$
$$K_{Ud} = \frac{5}{1000} = 0,005\text{В}$$

Якщо необхідно вимірювати струм на вході інвертора напруги – використовують шунт (наприклад, на струм 300 А з виходом 75мВ) з вимірювальним перетворювачем напруги типу ПИНТ-1. В останнього використовують вхід на 75мВ та вихід на 5 В.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом буде дорівнювати:

$$K_{Id} = \frac{U_{\text{вих1}}}{U_{\text{вх1}}}, \quad (5.10)$$
$$K_{Id} = \frac{5}{300} = 0,016 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Для одержання сигналу зворотного зв'язку за потужністю на вході інвертора напруги необхідно перемножити сигнали з Давачів напруги та струму.

Сама потужність на вході інвертора напруги дорівнює:

$$P_d = \frac{P_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{інв}}}, \quad (5.11)$$

де $\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора;

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД тягового асинхронного електродвигуна.

Параметри зворотних зв'язків щодо фазного струму асинхронного електродвигуна та частоті його обертання визначають аналогічно вищерозглянутим.

6 АЛГОРИТМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

При розгляді алгоритмів системи керування прийmemo наступні умовні позначки:

F – релейний оператор, що формується в мікропроцесорній системі керування (МПСК);

S – логічний перемикач, що формується в МПСК;

J(1) – інформаційний сигнал каналу CAN1 (ПК – МПСК);

J(2) – інформаційний сигнал каналу CAN2 (МПСК – СКІН).

Вихідні сигнали від ПК до МПСК (CAN1):

J(1) N_{км} = N0, N1, N2, N3 - 4-х бітний код позиції контролера керування;

J(1) F_{рух} – режим «Рух»;

J(1) F_{гальм} – режим «Гальмування»;

- J(1) F_{вибіг} – режим «Вибіг»;
- J(1) F_в – рух «Вперед»;
- J(1) F_н – рух «Назад»;
- J(1) F_{ін} – дозвіл на включення інвертора.

Вихідні сигнали від МПСК до ПК (CAN1):

- J(1) I_ф – діюче значення струму електродвигуна;
- J(1) V – швидкість об'єкту;
- J(1) P – потужність електроприводу;
- J(1)U_d – напруга мережі живлення;
- J(1) I_d – активний струм на вході інвертора напруги.

Вихідні сигнали від МПСК до СКІН(CAN2):

- J(2) F_{вп} – завдання вихідної частоти для інвертора напруги;
- J(2) U_{вш} – завдання глибини модуляції для інвертора напруги;
- J(2) F_{ін} – команда на включення інвертора напруги;
- J(2) F_в – команда рух «Вперед»;
- J(2) F_н – команда рух «Назад»;
- J(2) F_{гальм} – режим «Гальмування».

Вихідні сигнали від СКІН до МПСК (CAN2):

- J(2) F_{відм} – відмова в роботі інвертора напруги;
- J(2) F_{гальмт} включення гальмівного транзистора інвертора напруги.

Ключі перемикання режимів роботи електроприводу, які формуються в мікропроцесорній системі керування, наведені нижче. Для прикладу наведений варіант електроприводу з двома електродвигунами. Штрих над перемикачем або релейним оператором означає, що він має інверсне значення.

Режим «Рух»:

$$S_{\text{рух}} = J(1)F_{\text{рух}} \cdot (J(1)F_{\text{в}} \oplus J(1)F_{\text{н}}) \cdot J(1)F_{\text{ін}} \cdot (\bar{S}_{\text{ом1}} + \bar{S}_{\text{ом2}}), \quad (6.1)$$

де $\bar{S}_{\text{ом1}}$ – включений стан першого електродвигуна;

S_{OM2} – включений стан другого електродвигуна.

Режим «Гальмування»:

$$S_{Гальм} = J(1)F_{Гальм} \cdot (J(1)F_{В} \oplus J(1)F_{Н}) \cdot J(1)F_{ІН} \cdot \bar{S}_{OM1} \cdot S_{OM2}. \quad (6.2)$$

Режим «Вибіг»:

$$S_{Вибіг} = J(1)F_{Вибіг} \cdot (J(1)F_{В} \oplus J(1)F_{Н}). \quad (6.3)$$

Команди керування, які формуються мікропроцесорною системою керування для СКІН, наведені для вище вказаного варіанта електроприводу.

Команда на включення тягового інвертора:

$$J(2)F_{ІН} = J(1)F_{ІН} \cdot (J(1)F_{Рух} + J(1)F_{Гальм}) \cdot (\bar{S}_{OM1} + \bar{S}_{OM2}). \quad (6.4)$$

Команда «Вперед»:

$$J(2)F_{В} = J(1)F_{В}. \quad (6.5)$$

Команда «Назад»:

$$J(2)F_{Н} = J(1)F_{Н}. \quad (6.6)$$

Аналогічно можна записати й інші команди.

7 ЦИФРОВІ КАНАЛИ ЗВ'ЯЗКУ

В 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.

Всі 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 в 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.

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 в таблиці 7.1. Аналогічний вигляд має протокол обміну між МПСК та системою керування інвертора напруги (СКІН).

Таблиця 7.1 – Протокол обміну між пультом керування та мікропроцесорною системою керування

№ з/п	Параметр	Одиниця виміру	Інформаційний зміст	Джерело
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	$N_{км}$	4 біт	Номер позиції контролера	ПК
7	$F_{рух}$	1 біт	Режим «Рух»	ПК
8	$F_{гальм}$	1 біт	Режим «Гальмування»	ПК
9	$F_{вибіг}$	1 біт	Режим «Вибіг»	ПК
10	F_v	1 біт	Рух «Вперед»	ПК
11	F_n	1 біт	Рух «Назад»	ПК
12	$F_{ін}$	1 біт	Команда на включення інвертора напруги	ПК

8 ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

В якості давачів частоти обертання електродвигуна можна використовувати давачі типу НІА фірми HEINZMANN або типу KMG-2H фірми «Красс Маффай». Вказані давачі імпульсів призначені для безконтактного сприйняття параметрів руху зубчатого колеса або зубчатої рейки.

Для прикладу розглянемо давач типу KMG-2H.

За імпульсами напруги, що одержані на виході давача, можна судити про число оборотів, швидкість руху і прискорення, а завдяки вбудованій в давач другій сприймаючій системі – напрям обертання і напрям поступального руху. Як перша, так і друга система діють аж до моменту абсолютного спокою. Для обох систем нижня межа частоти обертання складає 0 Гц. Системи мають однакове конструктивне виконання, працюють від одного загального джерела електроживлення і можуть взаємно контролюватися в процесі експлуатації.

Кожна з двох сенсорних систем давача виконана на магнітних чутливих елементах, розташованих на одному загальному для двох систем постійному магніті і включених за диференціальною схемою. Сенсорні системи сприймають

зміни параметрів магнітного поля, що вносяться зубчатим колесом при його русі. Конструктивні параметри давача вибрані так, щоб при модулі зубчатого колеса, що дорівнює 2, на обидва виходи поступали сигнали зі зсувом за фазою один щодо одного на 90°. Для забезпечення необхідної перешкодостійкості, кожний з двох вихідних сигналів подається спочатку на схему запуску з операційним підсилювачем на виході.

Вихідний сигнал стійкий до коротких замикань і має певний залишковий рівень імпульсу (відмінний від нуля), завдяки чому правильність функціонування електронного вузла може перевірятися за сигналом на його виході не тільки в режимі видачі імпульсів, але і в режимі спокою. Для перевірки застосовують зовнішній електронний пристрій. Тим самим забезпечують можливість розпізнавання обриву, короткого замикання або шунтування в сполучній лінії давача.

Обидві сенсорні системи, а також електронний блок розміщуються в міцному, захищеному від корозії металевому патрубку з фланцем, що дозволяє застосовувати їх в несприятливих умовах навколишнього середовища.

Таблиця 8.1 – Технічні характеристики давача імпульсів КМГ-2Н

Характеристика / показник	Дані / Виконання
1	2
Конструктивне виконання	Подвійна система в металевому корпусі
Ступінь захисту згідно з МЭК 529 (EN 606 /28 /YDE 170 частина 1)	IP65 (тільки з відповідним штекером і сполучним кабелем)
Електричне з'єднання	Гнучкий екранований кабель, 4х AWG (американський сортамент дротів) 20 з вільним кінцем; стандартна довжина 2м; екран з'єднується з корпусом і фланцем
Маса	Не більше 0,29 кг (разом із стандартним кабелем)
Діапазон температур	-40°... +100°С
Принцип дії чутливого елемента	Магнітна диференціальна сенсорна система

Продовження таблиці 8.1

1	2
Квантуючий елемент	Феромагнітний ротор (зубчате колесо або зубчата рейка); модуль 2 з певними обмеженнями; можливі інші модулі
Контрольовані величини	Кількість оборотів швидкості руху; пройдений шлях; кут повороту 0,1...1,5 мм
Відстань від давача до квантуючого елемента або допустимий повітряний зазор при модулі 2	Номінальна відстань 0,8 мм, допуск $\pm 0,7$ мм
Робоча напруга	$U_0 = 15$ В пост. струму $\pm 20\%$ (12 В пост. струму, 18 В пост. струму)
Струм споживання без навантаження	Не більше 33 мА, звичне 22 мА
Струм навантаження на виході кожної системи	Не більше 10 мА
Компоновка системи	З двотактним задаючим пристроєм
Внутрішній опір системи	Не більше 50 Ом
Вихідний сигнал	Прямокутні імпульси; коефіцієнт заповнення періоду імпульсів 1:1; інтервал допуску залежить від форми зубів ротора
Крутизна фронту	15 мкс ± 10 мкс
Нижній рівень імпульсу	+2,0 В $\pm 10\%$ (щодо 0 В)
Верхній рівень імпульсу	$U_p - (1,6\text{В} \pm 40\%)$
Діапазон частот:	система 1 – 0 Гц
нижня межа частоти	система 2 – 0 Гц система 1 – 20 000 Гц
верхня межа частоти	система 2 – 20 000 Гц
Захист від впливу зовнішніх електричних полів	Екранування каналів передачі вихідних сигналів, коаксіальний екран, що з'єднується з корпусом і фланцем давача
Допустимий рівень електричних перешкод	20В/м (згідно з МЕК 1000-4-5)
Допустимий рівень магнітних перешкод	10 кА/м (для магнітних полів постійного і змінного струму)

Закінчення таблиці 8.1

1	2
Електрична міцність ізоляції	1 кВ пост. струму (між електронним блоком і корпусом Давача)
Допустиме механічне навантаження	Згідно з EN 80008 30 q, середньоквадратичне значення
Вібрація	100 Гц уздовж осей X Y Z

Таблиця 8.2 – Характерні особливості давачів

Показник	Виконання
Можливість поточного контролю	Забезпечується прийнятими нижнім і верхнім рівнями імпульсів і виробляється шляхом порівняння сигналів двох систем, починаючи з 0 Гц
Стійкість при коротких замиканнях	Давач відрізняється стійкістю до коротких замикань
Захист від зміни полярності	Давач володіє абсолютною стійкістю до зміни полярності
Можливість поточного контролю в стані спокою (при $v = 0$ м/с)	Забезпечується зовнішнім електронним пристроєм
Розпізнавання напряму обертання (починаючи з $v = 0$ м/с)	Можливо за допомогою зовнішнього електронного пристрою

Давач КМГ-2Н має стандартне конструктивне виконання (рис. 8.1, 8.2).

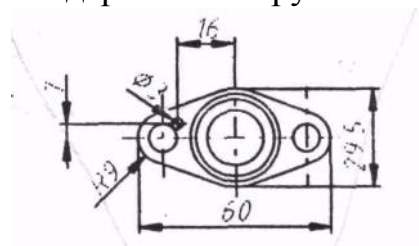


Рисунок 8.1 – Давач КМГ-2Н (вид знизу)

Найменший допустимий радіус вигину кабелю становить 25 мм.

Сполучний кабель 1xAWG (американський сортамент дротів) згідно з нормами MIL-W-81044: екран – мідь оцинкована; кожух – радокс, еластомір чорний; діаметр кабелю – 5,2 мм; стандартна довжина кабелю – 2 м.

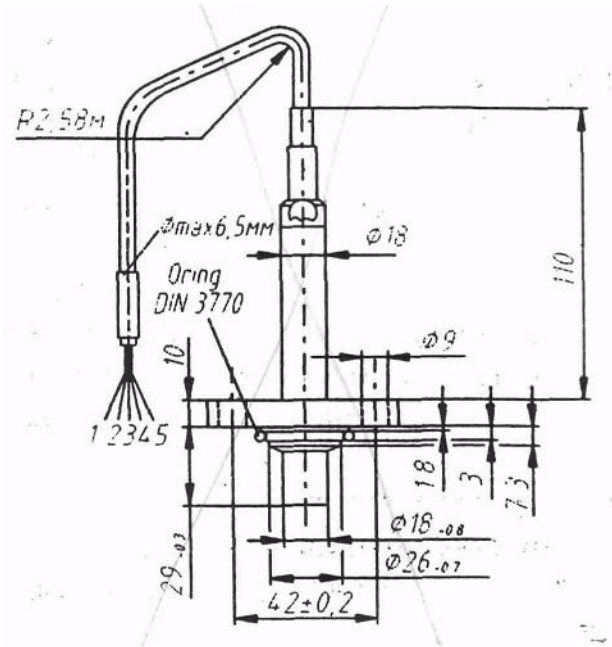


Рисунок 8.2 – Давач КМГ-2Н (вид збоку)

Розмітка живильного кабелю:

1. Плюс (+) – оранжевий колір.
2. Мінус (-) – зелений колір;
3. 1-й сигнал – синій колір (система 1).
4. 2-й сигнал – білий колір (система 2).
5. Екран – чорний колір з'єднань з корпусом.

Ротор для давача імпульсів

Форма зуба ротора (рис. 8.3) для давача імпульсів (квантуючого колеса) виконує другорядну роль. Але оптимальними є такі розміри:

- товщина зуба $s = 2,8$ мм;
- ширини впадини між зубами $w = 3,5$ мм;
- висота зуба $h = 4$ мм;
- кут профілю $d = 10^\circ \pm 10^\circ$;

– диск ротора повинен мати товщину не менше 20 мм, але при спеціальному юстируванні він може бути тоншим на 2 мм.

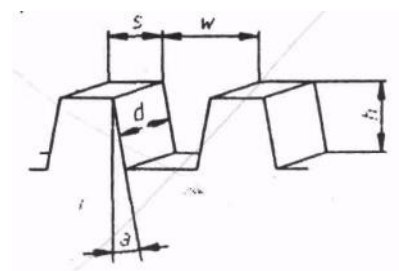


Рисунок 8.3 – Форма зуба ротора

У стандартному варіанті форма зуба квантуючого колеса має евольвентний профіль. Ніяких утруднень не виникає при застосуванні циліндрових, плоских, конічних зубчатих і косозубих коліс. При цьому необхідно мати на увазі, що подовжня вісь фланця завжди повинна розташовуватися перпендикулярно до профілів зубів або паралельно диску зубчатого колеса.

Конструкція давача імпульсів КМГ - 2Н розрахована на модуль зубчатого колеса, що дорівнює 2. Тим самим, відстань між зубами фіксується і дорівнює 6,28 мм.

Електричне зміщення фаз між першою та другою системами складає при цьому $90^\circ \pm 30^\circ$. Допустимий зазор лежить в межах від 0 до 1,5 мм і, звичайно, приймають його як такий, що дорівнює $0,8 \text{ мм} \pm 0,7 \text{ мм}$

Вимірювальний перетворювач напруги типу ПИНТ-1 призначений для гальванічної розв'язки й перетворення первинного сигналу напруги в пропорційний сигнал на виході з рівнем, що достатній для послідувочої обробки в колах керування й регулювання електроприводу. Перетворювач може експлуатуватися в довготривалому режимі при параметрах, що не перевищують номінальні.

Технічні характеристики перетворювача вимірювання напруги:

Кількість входів	3
Номінальне значення вхідної напруги:	
– на вході 1, В	75
– на вході 2, В	150
– на вході 3, В	1 000

При підвищенні вхідної напруги на входах 1, 2, 3 на 10% від номінальної характеристики вхід-вихід зберігаються.

Зміна амплітуди вхідної напруги в діапазоні частот від постійного струму до 2000 Гц:

- на вході 1, В - 75... +75
- на вході 2, В.....-150...+150
- на вході 3, В-1 000...+1 000

Номинальна напруга на виході (середнє значення) при номінальній напрузі на вході, В:

- 1 варіант..... 5
- 2 варіант8

Основна приведена похибка (не більше, %)..... $\pm 1,0$

Додаткова приведена похибка по кожному фактору вимог експлуатації (температура, вологість, зовнішнє електричне поле), не більше, % $\pm 1,0$

Опір навантаження перетворювача (не менше, Ом) 1 000

Ізоляція вхідних і вихідних кіл перетворювача між собою і відносно корпусу витримує випробувальну напругу, кВ 2,0

Напруга живлення, постійна (середнє значення), В $+15\pm 1$... -15 ± 1

Загальна точка джерела живлення гальванічно з'єднана з виходом перетворювача.

Потужність, що споживається від джерела живлення, не більше, Вт..... 4,0

Режим роботи перетворювача довготривалий

Вхідний опір перетворювача:

– на вході 1, кОм $0,1\pm 0,5\%$

на вході 2, кОм $200,1\pm 0,5\%$

на вході 3, кОм $1\ 333\pm 1\%$

Маса пристрою, не більше, кг 2,5

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. ; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: https://www.studmed.ru/popovich-mg-lozinskiy-oyu-elektromehanchn-sistemi-avtomatichnogo-keruvannya-ta-elektroprivodi-glavi-5-6-ukr_4faaaecc845.html, вільний).
2. Методичні рекомендації до організації самостійної роботи та проведення практичних занять із навчальної дисциплін «Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»). – Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова ; уклад. : М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 46 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/52196/1/2019%20печ.%20165М%20СП_ср_пз_2019.pdf, вільний).
3. Електроніка і мікросхемотехніка : у 4-х т. / [В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін.]. – Київ : Обереги, 2012. – Т.1 : Елементна база електронних пристроїв. – 300 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: https://iq.vntu.edu.ua/-/fm/fdb/671/PE/EMS.Т_4.1.pdf, вільний).
4. Щерба А. А. Електроніка та мікросхемотехніка : навч. посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» / А. А. Щерба, К. К. Победаш, В. А. Святненко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>, вільний).
5. Шпіка М. І. Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу: конспект лекцій для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка» / М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. – 82 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/55278-/1/2019%20печ%2080Л%20СП_2019.pdf, вільний).

6. Bose Bimal K. Power Electronics and AC Drives / Bose Bimal K. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p. – There is an electron. version. (Access mode: https://eee.sairam.edu.in/wpcontent/uploads/sites/6/2019/07/Modern_power_electronics_and_AC_drives.pdf, free).

7. Bose Bimal K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. / Bose Bimal K.– Elsevier, 2006. – 917 p. – There is an electron. version. (Access mode: https://eee.sairam.edu.in/wpcontent/uploads/sites/6/2019/07-/Power_Electronics_And_Motor_Drives_Advances_and_Trends.pdf, free).

8. Победаш К. К. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії : навч. посіб. / К. К. Победаш, В. А. Святненко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 244 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19823>, вільний).

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Завдання до розрахунково-графічної роботи

Варі- ант	$P_{\text{пит}},$ кВт/кН	$n,$ шт	$i_{\text{ред}}$	$m,$ т	$V_{\text{max}},$ км/год	$G,$ кН	$a_{\text{max}},$ м/с ²	$D_{\text{к}},$ м	$W,$ кН	$U_d,$ В	$I_{\text{ф}},$ А	$\eta_{\text{ред}}$	$\eta_{\text{інв}}$	$\eta_{\text{дв}}$	$Z_{\text{рот}},$ шт.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1,2	4	10,3	34,1	90	320	1,2	0,785	1,40	820	200	0,85	0,97	0,91	72
2	1,15	4	7,43	18,1	70	170	1,5	0,700	1,20	600	150	0,83	0,95	0,88	64
3	1,1	4	10,5	33,9	90	325	1,3	0,785	1,45	800	190	0,85	0,97	0,89	68
4	1,05	2	11,4	11,5	75	100	1,4	1,070	1,25	580	180	0,82	0,93	0,87	70
5	1,08	2	11,2	11,7	70	100	1,3	1,070	1,2	560	195	0,82	0,94	0,88	64
6	1,12	4	10,7	34,3	90	315	1,2	0,785	1,35	790	210	0,85	0,97	0,90	72
7	1,17	4	7,47	18,3	75	168	1,6	0,700	1,3	550	175	0,83	0,95	0,88	68
8	1,22	2	11,5	11,9	70	120	1,4	1,070	1,20	560	185	0,82	0,93	0,87	64
9	1,03	4	10,9	34,5	90	325	1,3	0,785	1,40	780	215	0,85	0,97	0,89	70
10	1,07	2	11,3	11,8	75	100	1,4	1,070	1,15	540	195	0,8	0,94	0,88	64
11	1,18	4	7,41	18,5	70	172	1,6	0,700	1,25	590	160	0,82	0,95	0,89	68
12	1,0	4	11,1	34,7	90	322	1,3	0,785	1,35	780	185	0,84	0,97	0,90	62

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
13	1,22	4	7,42	18,7	75	171	1,5	0,700	1,20	560	170	0,83	0,95	0,88	64
14	1,09	2	11,1	11,6	70	101	1,4	1,070	1,1	540	180	0,81	0,93	0,87	68
15	1,02	4	10,4	34,9	90	322	1,2	0,785	1,40	810	205	0,85	0,97	0,91	72
16	1,04	4	7,47	18,4	75	172	1,7	0,700	1,30	590	155	0,83	0,95	0,88	64
17	1,14	2	11,7	11,3	70	102	1,4	1,070	1,15	530	175	0,82	0,93	0,87	68
18	1,01	4	10,6	34,6	90	324	1,3	0,785	1,35	770	195	0,85	0,97	0,89	70
19	1,21	4	7,43	18,2	75	175	1,5	0,700	1,20	620	170	0,83	0,95	0,88	64
20	1,17	2	11,9	11,5	75	104	1,4	1,070	1,10	610	195	0,81	0,94	0,87	68
21	1,13	4	7,47	18,6	70	173	1,5	0,700	1,15	615	160	0,84	0,95	0,88	64
22	1,24	4	10,8	34,7	90	325	1,2	0,785	1,40	800	210	0,85	0,97	0,91	70
23	1,16	2	11,7	11,4	65	104	1,4	1,070	1,10	590	185	0,82	0,93	0,88	64
24	1,09	4	7,41	18,8	65	173	1,5	0,700	1,15	650	175	0,83	0,95	0,89	68
25	1,25	4	10,5	34,4	90	321	1,3	0,785	1,35	800	210	0,85	0,97	0,90	72

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до виконання розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)

Укладачі: **ЗАКУРДАЙ** Світлана Олександрівна,
ГЕРАСИМЕНКО Віталій Анатолійович,
ШПКА Микола Іванович

Відповідальний за випуск *М. В. Хворост*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *С. О. Закурдай*

План 2020, поз. 144М

Підп. до друку 22.03.2023. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 2,2

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002,
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.