

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
“СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ”
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

КРЕМЕНЧУК 2019

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Системи електропривода з автономним живленням» для студентів заочної форми навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Укладачі: ст. викладач О. А. Хребтова

Рецензент к. т. н., доц. В. О. Мельников

Кафедра систем автоматичного управління та електропривода

Затверджено методичною радою КрНУ імені Михайла Остроградського

Протокол “ ____ ” від “ ____ ” _____ 2019 р.

Голова методичної ради _____ проф. В.В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Зміст дисципліни	5
2 Рекомендації щодо виконання та оформлення контрольної роботи	7
3 Варіанти завдань контрольної роботи.....	8
4 Приклад виконання практичної частини завдання	9
5 Критерії оцінювання знань студентів	24
Список літератури	25
Додаток А Задання по варіантам	26

ВСТУП

Дисципліна «Системи електропривода з автономним живленням» лежить в основі дисциплін, що вивчають прикладні питання побудови, проектування та функціонування систем автоматизованого електроприводу на базі автономних джерел живлення, побудованих з використанням сучасної елементної бази. Метою виконання контрольної роботи є оволодіння студентами теоретичними основами синтезу та проектування, практичними навиками експлуатації сучасних систем автоматизованого електропривода при живленні від автономних джерел.

Сучасний етап розвитку електротехніки сприяв до розробки та використання в різних галузях людської діяльності електротранспорту. В даний час розрізняють наступні транспортні галузі: залізничний, автомобільний, морський, авіаційний, річковий, трубопровідний транспорт. Різні види електричного транспорту значною мірою позбавлені недоліків, притаманних транспорту з тепловими двигунами. Отримуючи живлення від електричних джерел, транспорт перетворює електричну енергію в механічну, що використовується для переміщення вантажів і пасажирів. Електромеханічні трансмісії набули широкого розповсюдження у транспортних засобах завдяки простоті передачі, перетворення та керування електричною енергією. При цьому електричні двигуни не викидають в повітря жодних забруднюючих речовин у газоподібному або рідкому вигляді. Тому електропривод з автономними джерелами живлення має широку сферу застосування.

Метою виконання контрольної роботи є закріплення студентами теоретичних знань та придбання практичних навичок розрахунку характеристик тягових електроприводів.

Унаслідок проведення контрольної роботи студенти повинні вміти розраховувати необхідні параметри електроприводів; розраховувати статичні, динамічні та енергетичні характеристики електродвигунів постійного та змінного струму; здійснювати вибір елементів силових та керуючих кіл електроприводів при живленні від автономних джерел.

1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1 Вступ. Загальні поняття та положення курсу

Предмет, задачі, зміст курсу, зв'язок з іншими дисциплінами спеціальності. Призначення, структура та основні елементи електропривода. Особливості умов роботи електропривода з автономними джерелами живлення. Класифікація електроприводів. Класифікація автономних джерел живлення.

Література: [1, с. 25–42; 2, с. 13–32].

Тема 2 Джерела енергії електропривода

Характеристика енергетичних показників акумуляторних батарей. Характеристика енергетичних показників електромеханічних акумуляторів. Характеристика енергетичних показників двигун-генераторних установок для постійного, змінного електропривода. Характеристика енергетичних показників комбінованих енергоустановок. Послідовна, паралельна та послідовно-паралельна структура системи електропривода при живленні від автономного джерела.

Література: [1, с. 31–39; 3, с. 38–62].

Тема 3 Тягові та гальмівні характеристики розімкнених та замкнених систем електроприводів з автономними джерелами живлення.

Вимоги до характеристик систем електродвигунів. Вимоги до елементів систем керування електроприводів. Умови роботи кінематичних ланцюгів системи електропривода для забезпечення необхідних показників якості роботи. Регулювання моменту електроприводів. Обмеження гальмівних характеристик.

Література: [1, с. 146–151; 4, с. 47–56].

Тема 4 Способи регулювання електроприводів з автономними джерелами живлення

Тиристорне та імпульсне регулювання напруги живлення електроприводів постійного струму. Частотне регулювання електроприводів змінного струму. Характеристики частотного регулювання. Векторне керування

системи електропривода. Електроприводи з вентильно-індукторними двигунами. Сервопривода.

Література: [1, с. 73–89; 5, с. 89–120].

Тема 5 Характеристики гальмування систем електроприводів з автономними джерелами живлення.

Класифікація систем гальмування. Характеристики двигунів при рекуперативному, реостатному та рекуперативно-реостатному гальмуваннях. Електричне гальмування за допомогою тиристорно-імпульсних перетворювачів. Вимоги до гальмівних характеристик систем електродвигунів з автономними джерелами живлення.

Література: [5, с. 121–155; 6, с. 619–631; 7, с. 78–93].

Тема 6 Основні структури електромеханічних передач привода

Послідовна, паралельна та послідовно-паралельна структура електромеханічних трансмісій. Переваги, недоліки та сфери застосування. Енергетичні діаграми роботи трансмісій у пускових, рушійних та гальмівних режимах. Електромеханічні трансмісії з буферними накопичувачами енергії. Робота теплового двигуна з максимальним коефіцієнтом корисної дії.

Література: [3, 8–12; 8, с. 16–24].

Тема 7 Функціональні елементи САК ЕП: задаючі, проміжні, елементи контролю, об'єкти регулювання, виконавчі і керуючі елементи.

Принципи регулювання, що застосовуються в САК ЕП. Типові функціональні схеми САК ЕП. Функціональні схеми САК, що застосовуються на вітчизняному ЕП.

Література: [8, с. 26–35; 9, с. 39–53, 175–185].

Тема 8 Призначення і області застосування системи автоведення.

Принципи оптимального управління СЕП. Алгоритми і програми автоматичного управління СЕП. Точність руху поїздів при автоведення. Автономні системи автоведення електропоїздів, пасажирських і вантажних поїздів. Системи телемеханічного управління СЕП.

Література: [8, с. 36–62; 9, с. 54–92].

2 РЕКОМЕНДАЦІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота з дисципліни містить теоретичне питання, а також практичну частину, яка складається з однієї задачі.

Виконання контрольної роботи є підсумковим завданням для закріплення пройденого курсу.

Номер варіанта визначають за двома останніми цифрами номера залікової книжки за таким правилом:

номери 01–22, 23–45, 46–68, 69–91, 92–100 – варіанти 1–22.

Теоритичне питання наведено у додатку А табл. А.1

Робота повинна бути оформлена на стандартних аркушах форматом А4.

Виконуючи набір тексту роботи на комп'ютері, дотримуються таких вимог:

- основний шрифт тексту Times New Roman, 14 pt;
- заголовки – великими літерами напівжирного шрифту;
- властивості абзацу: інтервал полуторний, відступ від краю тексту 1,25 см;
- підкреслювання та виділення **жирним** шрифтом **НЕ**

ВИКОРИСТОВУЮТЬ;

– для відділення тексту програми від основного тексту використовують форматування – *курсив*.

Кожний розділ пояснювальної записки повинен починатися з нової сторінки. Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи подано у додатку А.

Зміст контрольної роботи:

1. Титульна сторінка.
2. Коротко викладені теоретичного питання за варіантом.
3. Практична частина повинна містити пояснення до послідовності розрахунку та пояснення щодо формул за якими виконується розрахунок. Графічне зображення отриманих результатів можна виконувати як математичному редакторі та і в графічному редакторі.

3 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Варіант 1

Теоретична частина:

1. Коротко надати відповідь на теоретичне питання відповідно до варіанту (додаток А, табл А1).

2. Практична частина: Розробка математичної моделі системи генератор-двигун та розрахунок її параметрів.

Згідно з варіантом завдання (додаток А, табл. А.2) для прототипу системи генератор-двигун:

- розрахунок параметрів математичної моделі та побудова статичних характеристик системи генератор–двигун;
- побудова електромеханічних характеристики системи генератор–двигун;
- побудова математичної моделі у вигляді передавальних функцій системи генератор–двигун;
- розрахунок та побудова енергетичних характеристик системи Г-Д.

4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗАВДАННЯ

Завдання. Розробка математичної моделі системи генератор-двигун та розрахунок її параметрів.

Функціональна схема системи представлена на рис. 1. До її складу входить приводний двигун ПД, в якості якого може бути використаний некерований двигун постійного або змінного струму. Приводним двигуном приводиться в обертання якір керованого електромеханічного перетворювача – генератора або електромашинного підсилювача Г. Безпосередньо до якірної обмотці генератора підключається якірна обмотка виконавчого двигуна Д. Шляхом зміни напруги U_y на керуючій обмотці збудження генератора ОЗ регулюється потік збудження, отже, і напруга на виході генератора, тобто напруга на обмотці якоря двигуна, і таким чином виконується його керування.

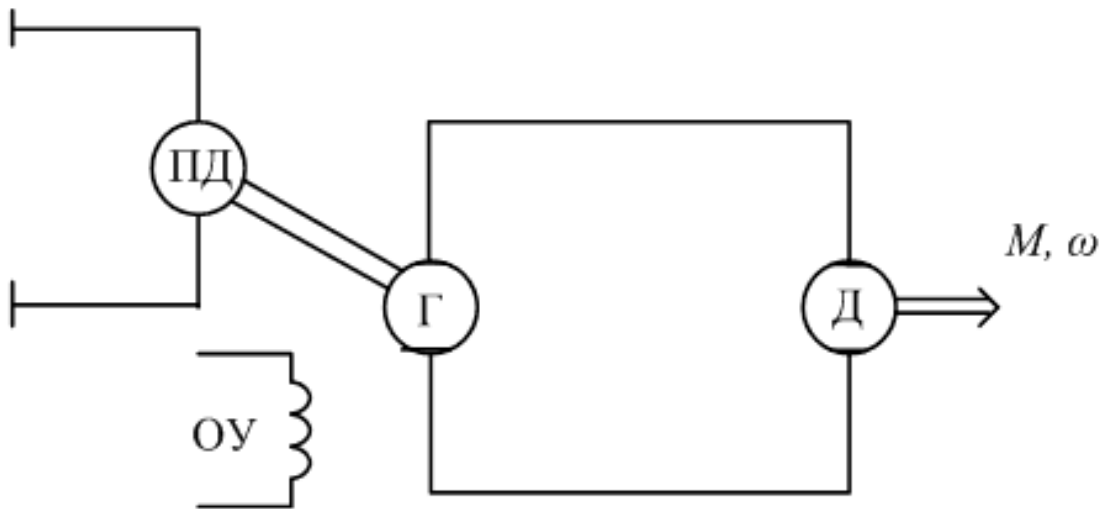


Рисунок 1 – Функціональна схема системи генератор – двигун

Електромеханічні характеристики приводу, відповідно до поданої схемою можуть бути записані виразами:

$$\omega = \frac{E_G}{K\Phi} - \frac{I_a R}{K\Phi}, \quad (1)$$

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{K\Phi} - \frac{MR}{(K\Phi)^2}, \quad (2)$$

де K , Φ – конструктивний коефіцієнт і потік; ω , M – швидкість і момент на валу двигуна;

$$R = R_{\text{я}} + R_{\text{яГ}} + R_{\text{з}},$$

де $R_{\text{я}}$ – опір якірного ланцюга двигуна; $R_{\text{яГ}}$ – опір якірного ланцюга генератора; $R_{\text{з}}$ – опір з'єднувальних проводів.

Електрорушійна сила генератора при постійній швидкості обертання без урахування насичення магнітної системи визначається співвідношенням:

$$E_{\Gamma} = k_1 U_y,$$

де k_1 – визначає зв'язок між Е.Р.С. генератора і напругою на обмотці збудження.

Підставляючи E_{Γ} в рівняння електромеханічних характеристик, отримаємо:

$$\omega = \frac{k_1 U_y}{K\Phi} - \frac{I_{\text{я}} R}{K\Phi}, \quad (3)$$

$$\omega = \frac{k_1 U_y}{K\Phi} - \frac{MR}{(K\Phi)^2}. \quad (4)$$

Відповідно до рівняннями (3,4) механічні характеристики системи Г-Д мають той же вигляд, що і характеристики двигуна рис. 2.

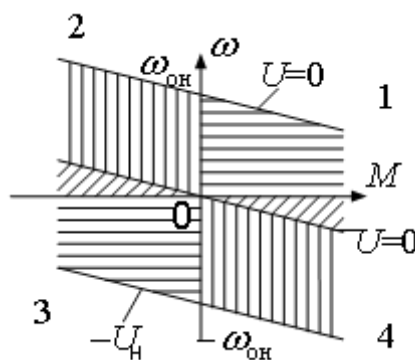


Рисунок 2 – Области існування режимів роботи привода

Відмінність буде лише в жорсткості. Дійсно, відповідно до визначення жорсткість механічної характеристики визначається співвідношенням $\beta = \partial M / \partial \omega$. Отже, згідно з (3, 4) отримаємо для системи Г-Д:

$$\beta = -\frac{(K\Phi)^2}{R_{яс}}. \quad (5)$$

Так як $R_{яс} > R_{я}$, то механічні характеристики системи Г-Д менш жорсткі, ніж природні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження.

В системі Г-Д можуть бути реалізовані всі можливі режими роботи приводу. Режим рекуперативного гальмування виникає, коли напруга генератора виявиться менше Е.Р.С. двигуна. При цьому струм від двигуна тече до генератора, генератор переходить в руховий режим і обертає приводний двигун ПД, який також переходить у генераторний режим і віддає енергію в первинну мережу. У режимі динамічного гальмування встановлюється $U_y = 0$, тому $E_g = 0$ і обмотка генератора є додатковим опором в ланцюзі якоря двигуна.

Гальмування противмиканням здійснюється шляхом реверсу U_y . Однак, при реверсі можуть виникнути неприпустимо великі струми в ланцюзі якоря, тому необхідно обмежувати керуючу напругу. Рівняння балансу енергії і механічних характеристик для різних гальмівних режимів системи Г-Д будуть тими ж, що і для двигуна (6, 7), якщо в них врахувати опір якріного ланцюга і напруга генератора.

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega} = -\frac{M}{\omega_0} = -\frac{(K\Phi)^2}{R_{я}}, \quad (6)$$

$$I_{я} = \frac{(U - E)}{R_{я}}. \quad (7)$$

Для того щоб отримати електромеханічні характеристики привода необхідної форми в системі Г-Д використовують зворотні зв'язки по різних координатах. В даному розділі ми розглянемо статичні властивості систем з жорсткою зворотним зв'язком по одній з координат.

Функціональна схема системи зі зворотним зв'язком по струму представлена на рис. 3.

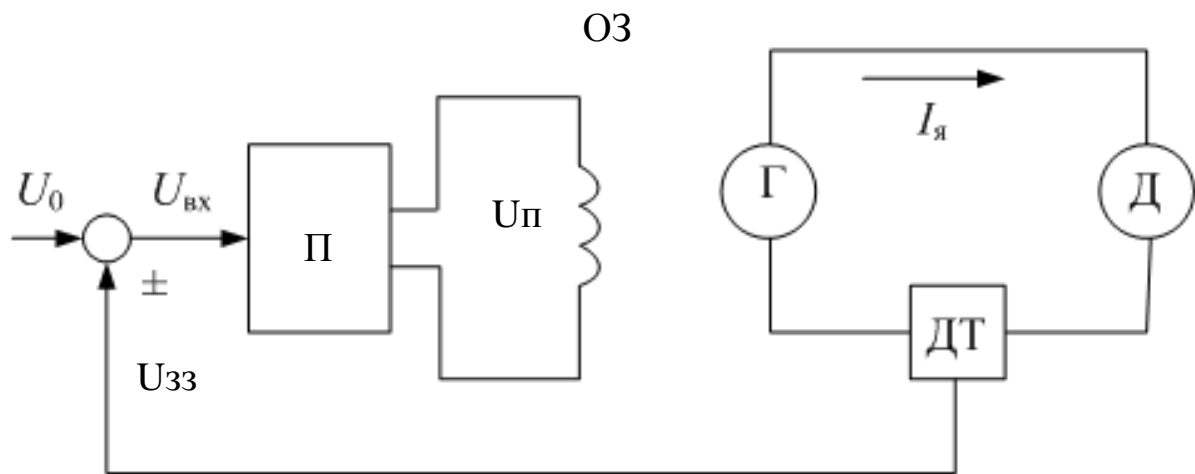


Рисунок 3 – Функціональна схема системи Г-Д зі зворотним зв'язком за струму

Для представлення характеристик системи скористаємося наступними рівняннями, які випливають з рис. 3:

$$U_{\text{вх}} = U_0 \pm U_{\text{зз}}, \quad (8)$$

$$E_{\Gamma} = U_{\text{вх}} k_{\text{п}} k_1 = (U_0 \pm U_{\text{зз}}) k_{\text{п}} k_1 = (U_0 \pm k_{\text{дс}} I_{\text{я}}) k_{\text{п}} k_1 \quad (9)$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга на вході підсилювача П, U_0 – напруга завдання вихідній координати приводу, $U_{\text{зз}}$ – напруга зворотного зв'язку за струму, $k_{\text{у}}, k_{\text{дс}}$ – передавальні коефіцієнти підсилювача і датчика струму відповідно, знаки \pm означають додатній і від'ємний зворотний зв'язок відповідно.

Підставами E_{Γ} з (9) у рівняння (4) і отримаємо:

$$\omega = \frac{(U_0 \pm k_{\text{дс}} I_{\text{я}}) k_{\text{п}} k_1}{K\Phi} - \frac{MR}{(K\Phi)^2}. \quad (10)$$

Перетворимо отримане рівняння механічної характеристики з урахуванням того, що $M = I_{\text{я}} K\Phi$. В результаті отримаємо:

$$\omega = \omega_0 - \frac{(R_{\text{я}} \pm k_{\text{дс}} k_{\text{п}} k_1)}{(K\Phi)^2 M}, \quad (11)$$

де $\omega_{03} = U_0 k_y k_1 / (K\Phi)$ – швидкість холостого ходу двигуна, що задається напругою U_0 , Знак «+» в даному випадку означає негативну, а знак «-» – позитивну зворотний зв'язок.

Відповідно до (11) жорсткість механічних характеристик системи Г-Д визначається виразом:

$$\beta = -\frac{(K\Phi)^2}{R_{я} \pm k_{дс} k_{п} k_1}, \quad (12)$$

Вираз (12) показує, що введення відємного зворотного зв'язку робить характеристики м'якшими в порівнянні з природною характеристикою, а додатній – більш жорсткими.

При виведенні рівняння (11) не враховувалася можливість насичення каналу регулювання Е.Р.С. генератора. Однак в реальному приводі її значення не може перевищувати деяких граничних значень – $\pm E_{гmax}$, Обумовлених насиченням або підсилувача, або генератора. При відомому значенні $E_{гmax}$ з рівняння (9) неважко знайти граничні значення струмів, при яких генератор виходить в насичення при заданому U_0 .

При додатньому зворотньому зв'язку з (9) маємо:

$$k_n k_1 U_0 + k_{вз} k_1 I_{я2/\partial33} = E_{гmax}, \quad (13)$$

звідси

$$I_{я2/\partial33} = -\frac{(E_{гmax} - k_{п} k_1 U_0)}{k_{дс} k_{п} k_1}, \quad (14)$$

і лінійна область роботи приводу обмежиться значеннями струмів:

$$I_{я} \in (0, I_{я2/\partial33}). \quad (15)$$

При відємному зворотньому зв'язку таким же шляхом отримуємо:

$$I_{я2/\partial33} = -\frac{(k_{п} k_1 U_0 - E_{гmax})}{k_{дс} k_{п} k_1},$$

і лінійна область роботи буде обмежена значеннями струмів:

$$I_{я} \in (I_{я2/\partial33}, I_n),$$

де I_n – пусковий струм двигуна при даному U_0 .

Механічні характеристики системи Г-Д з урахуванням насичення генератора в першому квадранті представлені на рис. 4, де пунктиром показана природна характеристика, а $M_z = I_{яz} K \Phi$.

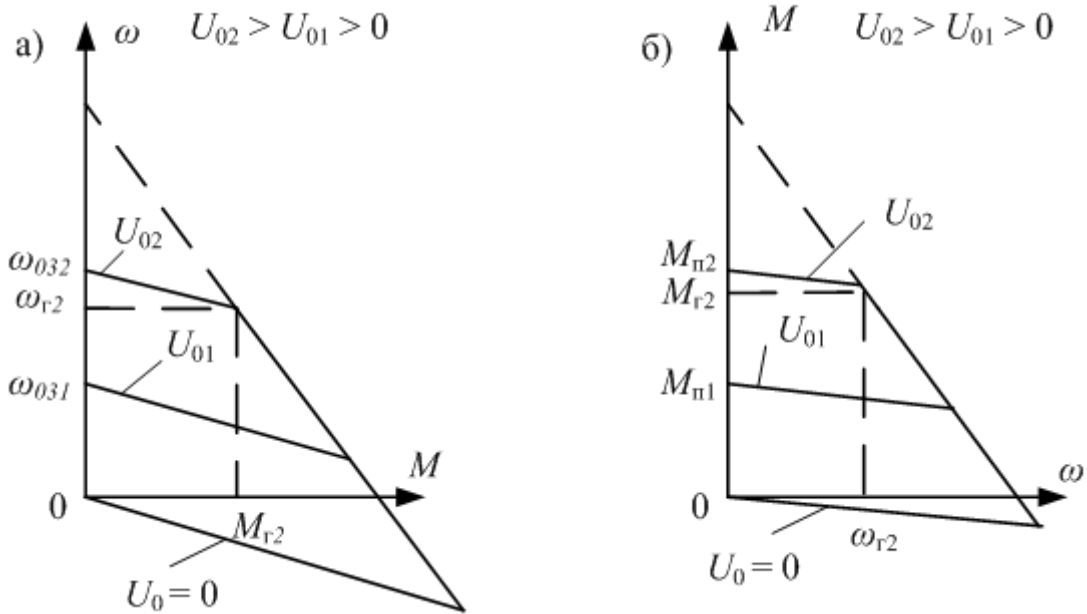


Рисунок 4 – Механічні характеристики системи Г-Д зі зворотним зв'язком по струму: а) додатнім; б) від'ємним

Функціональна схема системи зі зворотним зв'язком за швидкістю представлена на рис. 5. В даному випадку Е.Р.С. генератора визначається співвідношенням:

$$E_z = (U_0 \pm k_{oc} \omega) k_y k_l$$

Підставляючи наведене значення E_z в рівняння (5), після перетворень отримаємо:

$$\omega = \omega_{03} - \frac{MR_{я}}{(K\Phi \pm k_{33} k_{п} k_l) K\Phi}, \quad (16)$$

де $\omega_{03} = U_0 k_y k_l / (K\Phi + k_y k_l k_{oc})$ – швидкість холостого ходу, задана керуючим сигналом, k_{33} – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості, знак «+» відповідає від'ємному, а знак «-» – додатному зворотним зв'язкам. Жорсткість механічної характеристики визначається співвідношенням:

$$\beta = - \frac{(K\Phi \pm k_{33} k_{п} k_l) K\Phi}{R_{я}}, \quad (17)$$

Рівняння (17) показує, що при відємному зворотному зв'язку жорсткість характеристик збільшується, а при додатному – зменшується.

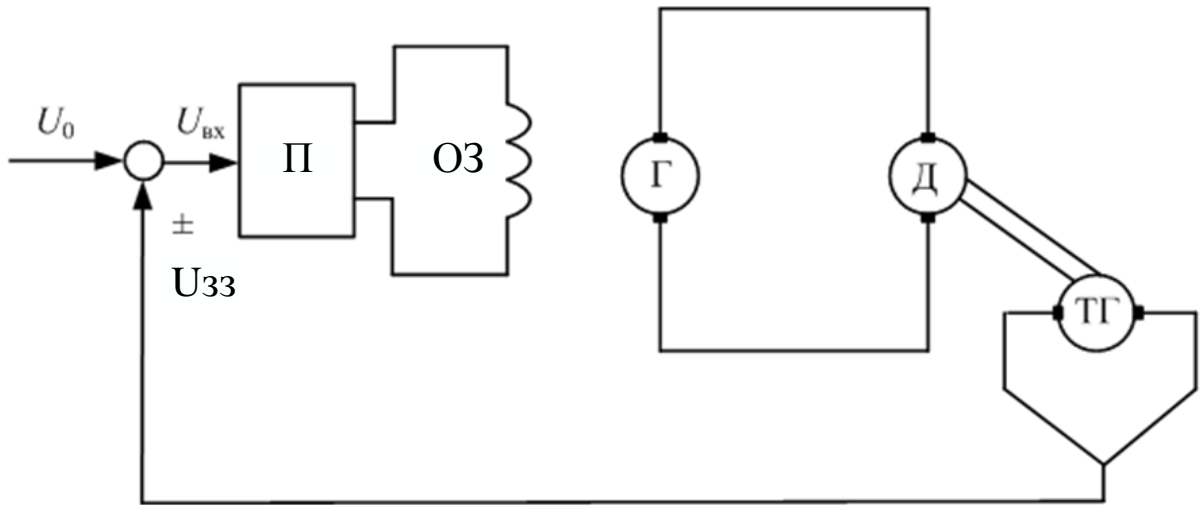


Рисунок 5 – Функціональна схема системи Г-Д зі зворотним зв'язком за швидкістю

Як і в попередньому випадку знайдемо значення вихідної координати, при якому відбувається насичення генератора.

При додатному зворотному зв'язку:

$$k_y k_1 U_0 + k_{oc} \omega_{z|\partial z z} = E_{zmax},$$

звідси

$$\omega_{z|\partial z z} = \frac{(E_{zmax} - U_0 k_p k_1)}{k_{z3}}, \quad (18)$$

і лінійна область роботи приводу обмежиться значеннями швидкостей

$$\omega \in (0, \omega_{z|c}). \quad (19)$$

При від'ємному зворотному зв'язку:

$$\omega_{z|\partial z z} = \frac{(U_0 k_p k_1 - E_{zmax})}{k_{z3}},$$

лінійна область роботи буде обмежена значеннями швидкостей:

$$\omega \in (\omega_{z|6z z}, \omega_{0z}).$$

Механічні характеристики системи зі зворотним зв'язком за швидкістю представлені на рис. 6.

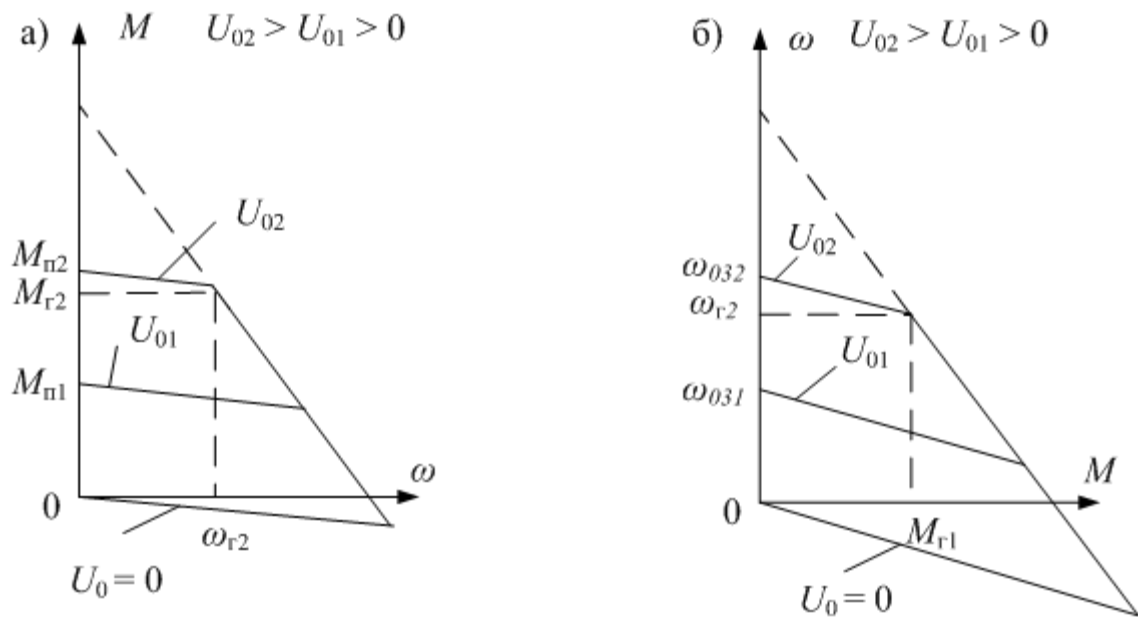


Рисунок 6 – Механічні характеристики системи Г-Дс зворотним зв'язком за швидкістю: а) додатнім; б) від'ємним

2. Побудова електромеханічних характеристики системи Г-Д

Під регулюванням характеристиками розуміємо залежності:

$$\omega = F_1(U_0) \text{ при } M = \text{const},$$

$$M = F_2(U_0) \text{ при } \omega = \text{const}.$$

Загальний вигляд системи рівнянь без зворотного зв'язку і при їх наявності буде однаковим і таким же, як у двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні зміною напруги на якорі. В даному випадку зручніше представити характеристики що регулюються в абсолютних одиницях у вигляді:

(4.16)

$$\omega = a_1 U_0 - b_1, \quad M = a_2 U_0 - b_2. \quad (20)$$

Згідно (5) при відсутності зворотного зв'язку маємо:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{k_1}{K\Phi}; \\ b_1 = \frac{MR_{я}}{(K\Phi)^2}. \end{cases}, \quad (21)$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{k_1 K \Phi}{R_{\text{я}}}; \\ b_2 = \frac{\Omega (K \Phi)^2}{R_{\text{я}}}. \end{cases} \quad (22)$$

При введенні зворотного зв'язку за струму з (11) знайдемо:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{k_1 k_{\text{п}}}{K \Phi}; \\ b_1 = \frac{R_{\text{я}} \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}}{(K \Phi)^2} M. \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{k_1 k_{\text{п}} K \Phi}{R_{\text{я}} \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}}; \\ b_2 = \frac{(K \Phi)^2 \omega}{R_{\text{я}} \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}}. \end{cases} \quad (24)$$

При введенні зворотного зв'язку по швидкості з (16) маємо:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{k_1 k}{K \Phi \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}}; \\ b_1 = \frac{R_{\text{я}} \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}}{(K \Phi \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}) K \Phi} M. \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{k_1 k_{\text{п}} K \Phi}{R_{\text{я}}}; \\ b_2 = \frac{(K \Phi \pm k_1 k_{\text{п}} k_{33}) K \Phi}{R_{\text{я}}} \xi. \end{cases} \quad (26)$$

Вирази (20) показують, що ідеальний регулятор швидкості або моменту ми отримаємо, якщо за допомогою зворотного зв'язку забезпечимо відповідно $b_1=0$ і $b_2=0$. З (23, 24) можна зробити висновок, що $b_1=0$ при додатному зворотньому зв'язку за струмом і виконанні умови:

$$R_{\text{яс}} = k_y k_I k_{33},$$

а з (25, 26) знайдемо, що $b_2=0$ при додатньому зворотньому зв'язку за швидкістю і виконанні умови

$$K \Phi = k_y k_I k_{33}.$$

При регулюванні швидкості момент на валу двигуна є чинником збурення, введення додатного зворотнього зв'язку за струмом, який пропорційний моменту, за термінологією теорії автоматичного регулювання можна назвати регулюванням по збуренню. Також можна назвати регулятор моменту при введенні додатного зворотнього зв'язку за швидкістю. Виконання наведених вище умов означає повну компенсацію збурень. Однак при цьому виникає небезпека перекомпенсації.

У результаті зміни умов експлуатації привода або зміни напруги живлення можуть змінитися активний опір якірного ланцюга або передавальні коефіцієнти датчика, підсилювача або генератора так, що умови компенсації зміняться. Більш того, при цьому виявиться $b_1 < 0$, $b_2 < 0$, тобто жорсткість механічної характеристики привода стане позитивною. Це, призведе до втрати статичної стійкості привода. Тому в приводі доцільно використовувати "слабкі" компенсуючі – додатні зворотні зв'язки за струмом і швидкістю, не доходючи до режиму повної компенсації збурення.

Більш раціонально використовувати від'ємні зворотні зв'язки: при регулюванні швидкості – по швидкості і при регулюванні моменту – за струмом. Таке регулювання називають регулюванням по відхиленню. При розрахунку коефіцієнтів регулювальних характеристик a і b необхідно мати на увазі, що рівняння (23-26) справедливі в інтервалах зміни координат, що визначаються за (14) і (19). Якщо яка-небудь з координат виходить із зазначених інтервалів, необхідно користуватися рівняннями (21). В результаті по рівняннях (20) досить просто можна розрахувати похибки регулювання в діапазоні зміни регульованих координат і при відомих збуреннях.

3. Побудова математичної моделі у вигляді передавальних функцій системи Г-Д

Згідно функціональної схемою рис. 1 і з урахуванням рівнянь статичних характеристик і динамічних властивостей двигуна постійного струму динамічні процеси системи Г-Д можуть бути описані системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_y = i_\epsilon (R_\epsilon + L_\epsilon \frac{d\omega}{dt}) \\ E_z = I_\epsilon R_{\epsilon c} + L_{\epsilon c} \frac{dI_\epsilon}{dt} + K\Phi\omega \\ E_z = i_\epsilon R_\epsilon K_1 \rightarrow i_\epsilon < i_{\epsilon H} \\ E_z = E_{z max} \rightarrow i_\epsilon \geq i_{\epsilon H} \\ M = K\Phi I_\epsilon \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \end{array} \right. ,$$

де $i_{\epsilon H}$ – номінальний струм збудження генератора. Згідно з наведеними рівняннями структурна схема динамічної моделі системи Г-Д може бути представлена у вигляді рис. 7, де позначено $T_B = L_B / R_B$, $T_{\epsilon c} = L_{\epsilon c} / R_{\epsilon c}$, $L_{\epsilon c} = L_{\epsilon d} + L_{\epsilon g}$; тут $L_{\epsilon d}$, $L_{\epsilon g}$ – індуктивність обмотки якоря двигуна і генератора відповідно.

З структурної схеми неважко отримати передавальні функції системи по управлінню при регулюванні швидкості і моменту при роботі на лінійній ділянці характеристики генератора:

$$W_1(p) = \frac{\omega(p)}{U_y(p)} = \frac{k_1 / K\Phi}{(T_\epsilon p + 1)(T_{\epsilon c} T_M p^2 + T_M p + 1)}, \quad (27)$$

$$W_2(p) = \frac{M(p)}{U_y(p)} = \frac{k_1 (K\Phi / R_{\epsilon c}) T_M p + M_c}{(T_\epsilon p + 1)(T_{\epsilon c} T_M p^2 + T_M p + 1)}. \quad (28)$$

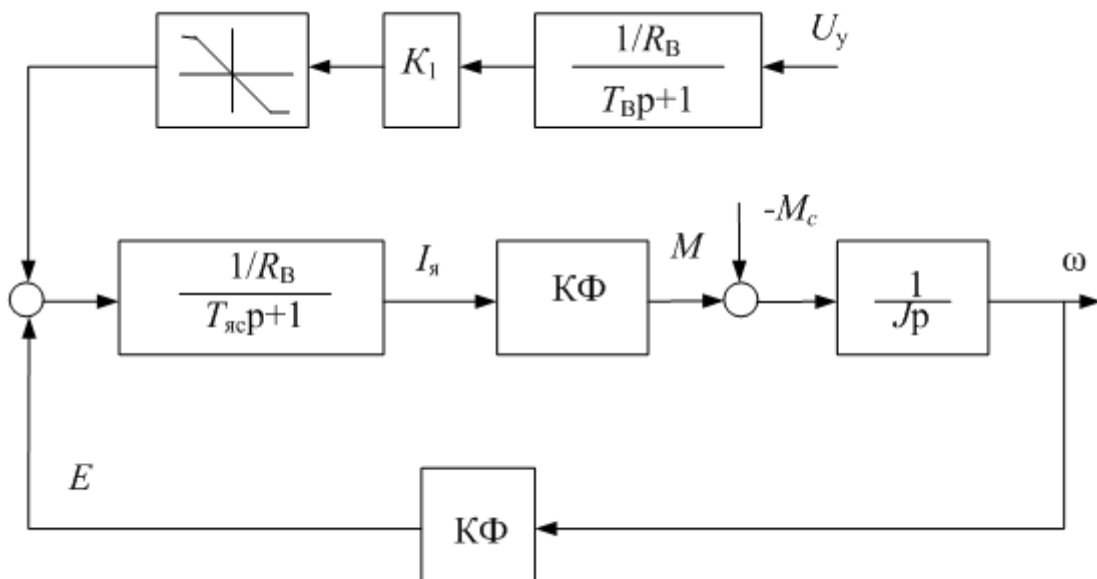


Рисунок 7 – Структурна схема динамічної моделі системи Г-Д

4. Енергетичні характеристик системи Г-Д

В системі Г-Д здійснюється багаторазове перетворення енергії. Очевидно, що потужність кожної попередньої машини повинна бути, по крайній мере, не менше потужності наступної. Сумарна встановлена потужність визначається виразом:

$$P_n = P_{пд} + P_r + P_d \geq 3P_d.$$

Вказана обставина є одним з основних недоліків системи Г-Д.

Визначимо ККД якірного ланцюга системи як відношення електромагнітної потужності двигуна до електромагнітної потужності генератора:

$$\eta_{я} = \frac{P_{ед}}{P_{е2}} = \frac{EI_{я}}{E_2 I_{я}} = \frac{E}{E_2}.$$

Тут E, P, C генератора можна уявити співвідношенням:

$$E_2 = I_{я} R_{яc} + E.$$

Звідси:

$$\eta_{я} = \frac{E}{I_{я} R_{яc} + E} = \frac{K\Phi\omega}{I_{я} R_{яc} + K\Phi\omega} = \frac{\omega}{\frac{MR_{яc}}{(K\Phi)^2} + \Omega}.$$

Крім того, необхідно врахувати втрати в приводному двигуні:

$$\eta_{нд} = \omega_{нд} / \omega_{0нд}.$$

де $\omega_{пд}$, $\omega_{0пд}$ – швидкість і швидкість холостого ходу приводного двигуна. В результаті електромагнітний К.К.Д. системи визначається співвідношенням:

$$\eta_n = \eta_{я} \eta_{нд} = \frac{\omega_{нд} \omega}{\omega_{0нд} \left(\frac{MR_{яc}}{(K\Phi)^2} + \Omega \right)}.$$

Для визначення повного К.К.Д. системи необхідно врахувати механічні і додаткові втрати у всіх трьох машинах.

5 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Розподіл балів, що отримують студенти

Види занять	Максимальна сума балів	
	денна форма	заочна форма
Лекції	16	10
Лабораторні роботи	10	5
Практичні заняття	10	5
Поточний контроль: – захист лабораторних робіт; – захист практичних робіт; – контрольна робота.	10 10 –	10 10 10
Проміжний контроль: – змістовий модуль 1; – змістовий модуль 2; – змістовий модуль 3.	8 8 8	10 10 10
Підсумковий контроль: Іспит	20	20
Усього	100	100

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромобили (методы расчета): Учебное пособие / Б.П. [Бусыгин Б.П.]. М.: Московский автомобильно-дорожный институт, 1979. 72 с.
2. Щетина В.А. Электромобиль: Техника и экономика / В.А. Щетина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центер, В.А. Богомазов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 253 с.
3. Туревский И.С. Теория автомобиля: Учебное пособие / И.С. Туревский. М.: Высш. шк., 2005. 240 с.
4. Гаспарян Г.А. Конструкция, основы теории и расчета автомобиля: Учебник [для техникумов] / Г.А. Гаспарян. М.: Машиностроение, 1978. 351 с.
5. Основы электрического транспорта / М. А. Слепцова, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др. Москва : Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.
6. Основы электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. Под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
7. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. Москва : Энергоиздат, 1981. 576 с.
8. Грищенко А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава /А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 320 с.
9. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда / В. К. Калинин. Москва : Транспорт, 1991. 480 с.
10. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. Москва : Высшая школа, 1975. 319 с.
11. Байрыева Л. С. Электрическая тяга: городской наземный транспорт / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. Москва : Транспорт, 1986. 206 с.

Завдання по варіантам

Таблиці А. 1 – Теоретичного питання

№ п/п	Питання
1	Наведіть структурну схему електропривода та охарактеризуйте його складові частини. Охарактеризуйте особливості роботи електродвигунів з автономними джерелами живлення. Наведіть класифікацію електродвигунів.
2	Що розуміють під керуванням параметрів електроприводів. Наведіть способи зміни параметрів електроприводів. Наведіть класифікацію технологічних механізмів, що використовують електричні двигуни з автономними джерелами живлення. Наведіть класифікацію енергетичних установок електродвигунів.
3	Охарактеризуйте основні ознаки енергетичних установок, що використовують паливні елементи. Поясніть необхідність використання послідовно-паралельного перемикачів паливних характеристик, наведіть їх вихідні характеристики. Охарактеризуйте основні ознаки енергетичних установок у яких відбувається накопичення енергії.
4	Перерахуйте вимоги, що висуваються до акумуляторних батарей. Яким чином змінюється зовнішня характеристика акумуляторних батарей залежно від заряду? Що являє собою електромеханічний накопичувач енергії? Наведіть приклад такого накопичувача. Перерахуйте недоліки, що характерні для електромеханічних накопичувачів енергії.
5	Надайте загальну характеристику енергетичних показників двигун-генераторних установок. Охарактеризуйте схеми силових кіл двигун-генераторних енергоустановок з тяговими двигунами постійного струму. Охарактеризуйте схеми силових кіл двигун-генераторних енергоустановок з двигунами змінного струму. Наведіть зовнішню характеристику генератора. Яким чином відбувається регулювання їх вихідних параметрів?
6	Охарактеризуйте вимоги, що висуваються до генераторів. Наведіть відомі схеми збудження генераторів постійного струму. Надайте загальну характеристику комбінованих енергоустановок. Яким чином відбувається розподілення енергетичних потоків? Наведіть вихідні характеристики комбінованих енергоустановок, що використовують акумуляторні батареї та теплоелектричні перетворювачі.
7	Охарактеризуйте загальні вимоги до характеристик електродвигунів. Що розуміють під поняттям електричної стійкості? Охарактеризуйте умови електричної стійкості різних

	типів електродвигунів. Що розуміють під поняттям механічної стійкості? Охарактеризуйте умови механічної стійкості різних типів електродвигунів. Поясніть вплив нерівномірного розподілу навантаження між електродвигунами.
8	Наведіть порівняння характеристик двигунів з різними способами збудження при нерівномірному розподілі навантаження. Яким чином впливають коливання напруги живлення на характеристики тягових електродвигунів з різними системами збудження. Охарактеризуйте причини зміни споживаної потужності при русі на різних профілях дороги. За якими параметрами здійснюється обмеження пускових характеристик тягових двигунів?
9	Охарактеризуйте характерні зони обмеження характеристик. Поясніть причини погіршення умов зчеплення коліс з поверхнею. Яким чином впливає жорсткість характеристик електродвигунів на використання сили тяги за зчепленням? Поясніть, яким чином впливає схема з'єднання електродвигунів на силу тяги за зчепленням.
10	Яким чином здійснюється процес регулювання сили тяги електрорухомого складу? Наведіть приклад схеми регулювання сили тяги електрорухомого складу постійного струму. За якими параметрами здійснюється обмеження гальмівних характеристик двигунів? Охарактеризуйте характерні зони обмеження гальмівних характеристик.
11	Надайте загальну характеристику методів регулювання швидкості двигунів постійного струму. Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості тягового двигуна постійного струму послідовного збудження зміною напруги живлення. Дайте характеристику процесу регулювання швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження шляхом введення додаткового опору. Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження шляхом зміни магнітного потоку.
12	Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості двигуна постійного струму змішаного збудження шляхом зміни магнітного потоку. Дайте характеристику процесу пуску двигунів з автономними джерелами живлення. Види систем пуску електродвигунів. Поясніть суть плавного реостатного пуску електродвигунів постійного струму. Дайте характеристику ступінчатого пуску електродвигунів з автономними джерелами живлення.
13	Яким чином відбувається пуск та регулювання швидкості електродвигунів за допомогою імпульсного регулювання. Наведіть схему імпульсного регулювання швидкості двигунів постійного струму. Яким чином змінюються вихідні показники перетворювача? Наведіть тягові характеристики електродвигунів з

	імпульсним керуванням. Охарактеризуйте характерні зони характеристики. Охарактеризуйте пуск та регулювання швидкості електрорухомого складу однофазно-постійного струму.
14	Наведіть способи регулювання швидкості асинхронних електродвигунів. Дайте характеристику частотного способу регулювання швидкості асинхронних двигунів. Наведіть приклад побудови системи регулювання швидкості електропривода постійного струму з автономним джерелом живлення. Наведіть приклад побудови системи регулювання швидкості електропривода змінного струму з автономним джерелом живлення.
15	Наведіть класифікацію систем гальмування. Надайте характеристику механічного гальмування. Наведіть гальмівні характеристики. Поясніть принцип електричного гальмування. Дайте характеристику рекуперативного гальмування.
16	Охарактеризуйте умови електричної стійкості різних типів електродвигунів в режимі рекуперативного гальмування. Наведіть електромеханічні та гальмівні характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження при рекуперативному гальмуванні. Наведіть схему рекуперативного гальмування двигуна постійного струму з незалежним збудженням, що дозволяє отримати м'які характеристики. Охарактеризуйте гальмівні характеристики в даному випадку. Поясніть принцип рекуперативного гальмування при імпульсному способі керування.
17	Наведіть схему та гальмівні характеристики електрорухомого складу однофазно-постійного струму при рекуперативному гальмування. Дайте загальну характеристику реостатному гальмування електродвигунів. Наведіть схему та гальмівні характеристики двигуна постійного струму з самозбудженням при реостатному гальмуванні. Наведіть схему та гальмівні характеристики двигуна постійного струму зі змішаним збудженням при реостатному гальмуванні.
18	Перерахуйте недоліки рекуперативного та реостатного гальмуванні. Дайте загальну характеристику рекуперативно-реостатного гальмування електродвигунів. Наведіть схему та характеристики рекуперативно-реостатного гальмування двигунів постійного струму змішаного збудження. Наведіть приклад реалізації рекуперативного гальмування в електроприводах постійного струму з автономними джерелами живлення.
19	Наведіть приклад реалізації рекуперативного гальмування в електроприводах змінного струму з автономними джерелами живлення. Охарактеризуйте варіанти конструктивного виконання електроприводів електромобіля. Наведіть функціональну схему електропривода електромобіля. Дайте характеристику силового кола електромобіля.

20	Дайте характеристику енергетичного блока електромобіля. Дайте характеристику допоміжного службового блока електромобіля. Охарактеризуйте вимоги до електродвигунів великовантажних автомобілів. Поясніть принцип дії електропривода великовантажного автомобіля змінно-постійного струму.
21	Поясніть принцип дії електропривода великовантажного автомобіля постійного струму. Наведіть класифікацію електромеханічних трансмісій з комбінованими енергетичними установками. Охарактеризуйте загальні принципи функціонування електроприводів з комбінованими енергетичними установками. Наведіть послідовну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи послідовної електромеханічної трансмісії.
22	Наведіть паралельну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи паралельної електромеханічної трансмісії. Наведіть послідовно-паралельну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи послідовно-паралельної електромеханічної трансмісії.

Таблиця А. 2 – Параметри двигунів постійного струму послідовного збудження

Тип	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/хв	n_{max} , об/хв	η
ДРТ-10А1	10	105	116	1575	3150	0,82
ДРТ-14	11,4	110	122	505	1845	0,785
ДРТ-23,5	9,4	185	61	1410	2500	0,85
ДРТ-13М	13,5	110	122	505	1845	0,78
ДРТ-14	15,8	145	132	700	1845	0,825
ДРТ-23,5	16,2	130	152	600	2500	0,81
ДРТ-14	14	130	132	615	1845	0,816
ДРТ-23,5	18,7	145	152	670	2500	0,817
ДРТ-13М	14,6	145	122	700	1845	0,825
ДРТ-23,5	23,5	185	152	900	2500	0,85

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Системи електропривода з автономним живленням» для студентів заочної форми навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Укладачі: ст. викладач О. А. Хребтова

Рецензент к. т. н., доц. В. О. Мельников

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16 Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600