

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Навчально-методичні рекомендації
до виконання курсового проекту

Електронне видання

ДНІПРО
2025

УДК 62-83(07)
Т 33

Упорядники:
Дмитро Володимирович Устименко
Олексій Юрійович Балійчук

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
G3.1.05 «Інтелектуальні системи електропостачання та електромехатронні комплекси»

Протокол №8 від 30.06.2025 р.

Т 33 Теорія електропривода: навчально- методичні рекомендації до виконання курсового проекту на тему: «Проектування системи Г-Д» / упоряд. Д. В. Устименко, О. Ю. Балійчук; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро: УДУНТ, 2025. – 32 с.

Навчально-методичні рекомендації до виконання курсового проекту на тему «Проектування системи Г-Д».

Навчально-методичні рекомендації містять порядок і правила розрахунку системи Г-Д, перехідних режимів у цій системі, побудови навантажувальних діаграм і правила вибору електродвигунів для різноманітних режимів роботи.

Іл. 6. Табл. 8. Бібліогр. 3.

© Устименко Д. В. та ін., укладання, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ ТА СКЛАД ПРОЕКТУ	5
1. ПОПЕРЕДНІ РОЗРАХУНКИ	7
2. ГРАФО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПІД ЧАС ФОРСУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ (при $\alpha > 1$) ГЕНЕРАТОРА І БЕЗ НЬОГО (при $\alpha = 1$)	15
3. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПУСКУ ДВИГУНА З НАВАНТАЖЕННЯМ І ВХОЛОСТУ	17
4. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС НАКИДАННЯ ТА СКИДАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ	21
5. ПОБУДОВА НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ДІАГРАМИ	23
6. ПЕРЕВІРКА ДВИГУНА ЗА НАГРІВОМ	23
7. РОЗРАХУНОК ДОПУСТИМОЇ КІЛЬКОСТІ УМИКАНЬ ДВИГУНА ЗА ГОДИНУ	24
8. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТЕЙ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА, ЗБУДЖУВАЧІВ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА І ГЕНЕРАТОРА ТА ВИБІР ЇХ ТИПІВ	25
9. ВИСНОВКИ	26
10. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА ПРОЕКТУ	26
Додаток 1	27
Додаток 2	29
Додаток 3	30
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	31

ПЕРЕДМОВА

Курсовий проєкт є одним із найважливіших етапів у підготовці кваліфікованих фахівців, що дозволяє студентам закріпити та поглибити теоретичні знання, отримані в процесі вивчення дисципліни «Теорія електропривода», а також розвинути практичні навички, необхідні для майбутньої професійної діяльності.

Для досягнення вищевказаної мети студент повинен виконати наступні задачі:

- Попередні розрахунки з вибором відповідного обладнання;
- Графо-аналітичний розрахунок перехідних процесів під час форсування збудження генератора і за його відсутності;
- Розрахунок перехідних процесів в системі під час пуску під навантаженням та без, а також при накиданні та скиданні навантаження;
- Графічна частина проєкту.

Видання у відповідності до робочої програми навчальної дисципліни «Теорія електроприводу» сприяє забезпеченню наступних очікуваних результатів навчання:

- ОРН2. Пояснювати сутність фізичних процесів, що протікають в складних електромеханічних системах;
- ОРН3. Застосовувати знання технічних характеристик, конструкційних особливостей, призначення і правил експлуатації устаткування та обладнання для вирішення технічних задач спеціальності;
- ОРН6. Оцінювати енергоефективність роботи електромеханічних систем та визначати оптимальні способи і методи її підвищення;
- ОРН7. Узагальнювати та упорядковувати отриманий результат при розв'язанні комплексних технічних задач спеціальності.

Навчально-методичні рекомендації розроблено з метою надання студентам послідовного керівництва щодо виконання курсового проєкту. У них детально описано основні етапи роботи, починаючи від аналізу технічного завдання та вибору оптимальних рішень, і закінчуючи оформленням пояснювальної записки та захистом проєкту.

Використання цих рекомендацій дозволить студентам більш ефективно організувати свою роботу, уникнути типових помилок і вчасно підготувати якісний курсовий проєкт. Крім того, робота над проєктом сприятиме розвитку навичок самостійного пошуку інформації, аналізу та синтезу, а також прийняття обґрунтованих інженерних рішень.

ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ ТА СКЛАД ПРОЕКТУ

Метою проекту є поглиблення та закріплення знань, одержаних під час вивчення курсу «Теорія електропривода».

Проект присвячено визначенню потужностей електричних машин у системі Г-Д, побудові навантажувальної діаграми, перевірки обраного головного двигуна за нагрівом та розрахунку перехідних процесів у спроектованій системі. Схема системи наведена на рис. 1.

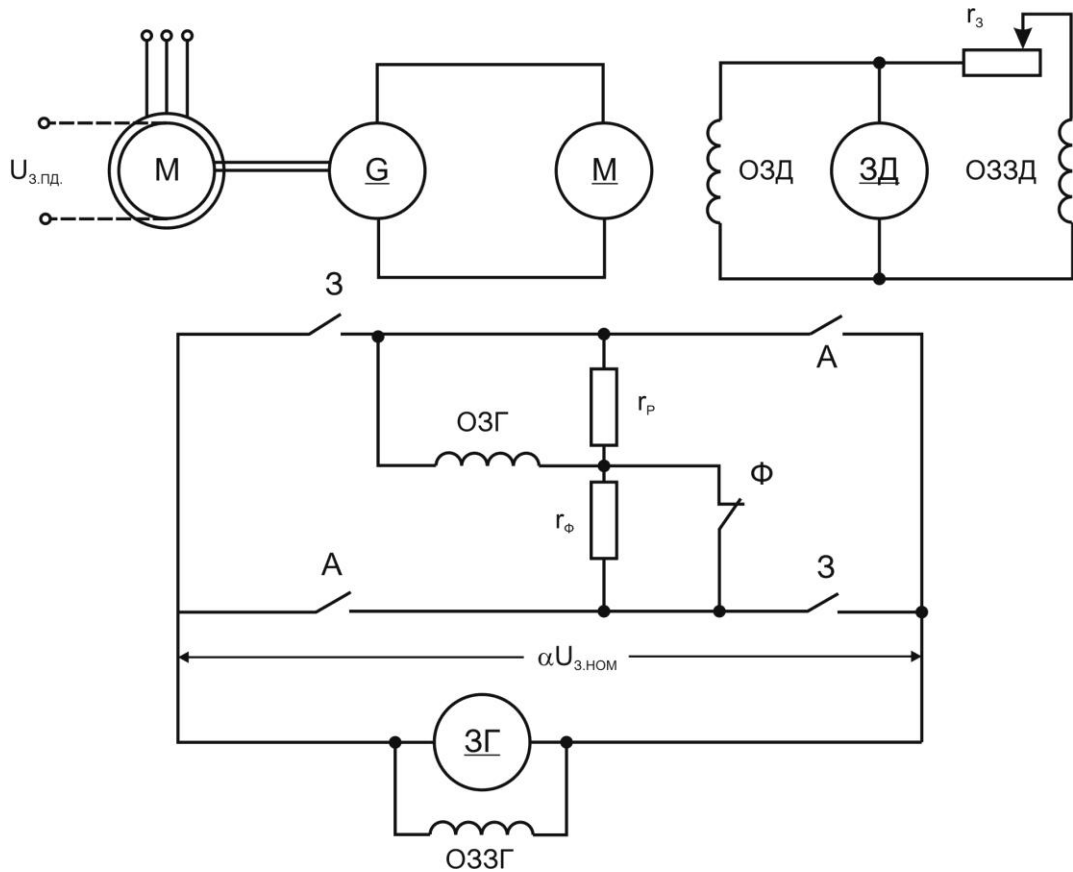


Рис. 1 Схема системи Г-Д:

М – мотор; G – генератор; ЗД – збудник головного двигуна; OЗЗД – обмотка збудження ЗД; ЗГ – збудник головного генератора; OЗЗГ – обмотка збудження ЗГ; OЗГ – обмотка збудження головного генератора; OЗД – обмотка збудження головного двигуна.

Проект складається з таких розділів:

1. Попередні розрахунки.
2. Графо-аналітичний розрахунок перехідних процесів під час форсування збудження генератора і за його відсутності (при $\alpha=1$).
3. Розрахунок перехідних процесів під час пуску двигуна під навантаженням та вхолосту.

4. Розрахунок перехідних процесів з накидання та скидання навантаження.
5. Побудова навантажувальної діаграми.
6. Перевірка головного двигуна за нагрівом.
7. Розрахунок допустимої кількості вмикань двигуна за годину.
8. Розрахунки потужностей привідного двигуна генератора, збудників (малопотужні електричні машини, що працюють в режимі генератора) головного двигуна і генератора та вибір їх типів.
9. Висновки.
10. Графічна частина проекту, яка складається зі схем, графіків різних залежностей, вміщених у розрахунково-пояснювальну записку, а також одного листа креслення з компоновкою на одному фундаменті всіх електричних машин.

У перелік вихідних даних для виконання проекту входять:

1. Тип двигуна.
2. Коефіцієнт інерції $FI = J/J_d = 1,6; 2,0; 2,3; 4,0$, де J – приведений до валу головного двигуна момент інерції привода і механізму.
3. Момент статичного опору руху механізму $M_c = (0,94...1,1) \cdot M_{д.ном}$, де $M_{д.ном}$ – номінальний момент двигуна.
4. Тривалість роботи на другій ділянці навантажувальної діаграми $t_2 = (4...7)$ с.
5. Тривалість роботи на шостій ділянці навантажувальної діаграми $t_6 = (3...5)$ с.

Вихідні дані записуються у окремий бланк, котрий підписується керівником проекту. Бланк завдання додається до розрахунково-пояснювальної записки, яка після закінчення проекту передається для перевірки керівнику проекту.

Виконуючи проект, із метою спрощення розрахунків можливо не урахувати:

- взаємний вплив обмоток якоря і збудження, оскільки у машинах постійного струму він надзвичайно малий;
- вплив гістерезису та вихрових струмів;
- наявність повздовжньої складової реакції якоря.

Розрахунки перехідних процесів можливо закінчувати, коли змінювана величина досягне 0,98 сталого значення, що відповідає часу, рівному чотирьом сталим часу. По цьому, попередньо оцінивши приблизну тривалість перехідного процесу, необхідно вибрати розрахунковий інтервал часу так, щоб крива процесу будувалась не менш ніж по 10 – 12 точках.

Всі розрахунки виконуються в одиницях СІ. Визначення різних величин у нижче наведених формулах розрахунків відповідають визначенням у таблицях додатків, або мають відмінний символ «Г» для генератора та «Д» – для двигуна.

1. ПОПЕРЕДНІ РОЗРАХУНКИ

1.1. Виписати з таблиці (дод. 1) основні параметри двигуна.

1.2. За завданими потужністю та напругою двигуна вибрати для системи Г–Д необхідний генератор і виписати з таблиці (дод. 2) його основні параметри. Вибір потужності генератора повинен бути виконаний з урахуванням ККД двигуна

$$\eta_d = \frac{P_d}{I_{d,ном} \cdot U_{d,ном}}. \quad (1)$$

1.3. Виписати з таблиці і побудувати вихідні магнітні характеристики двигуна і генератора (дод. 3.1, 3.2, 3.3).

1.4. Оскільки у каталогах та таблицях наведені опори обмоток електричних машин при $t^\circ=20^\circ\text{C}$, їх слід відповідно до стандартів привести до робочої температури для ізоляції класу «F», рівній $t^\circ=115^\circ\text{C}$. Отже,

$$r_{115^\circ} = K_t \cdot r_{20^\circ} = [1 + 0,004(115 - 20)] \cdot r_{20^\circ} = 1,38 \cdot r_{20^\circ}. \quad (2)$$

Ці значення використовувати у подальших розрахунках.

1.5. Визначити сталі якорів двигуна та генератора

$$c = \frac{p \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi}. \quad (3)$$

1.6. Визначити номінальні кутові швидкості двигуна і генератора

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30}. \quad (4)$$

1.7. Визначити номінальні ЕРС та магнітні потоки двигуна і генератора:

$$E_{ном} = U_{ном} \pm I_{ном} (r_{я} + r_{ко} + r_{дп}) \pm \Delta U_{щ}; \quad (5)$$

$$\Phi_{ном} = \frac{E_{ном}}{c \cdot \omega_{ном}}. \quad (6)$$

У виразі (5) знак «плюс» відповідає генератору, а «мінус» – двигуну. Спад напруги у щітковому контакті $\Delta U_{щ} = 2\text{ В}$.

1.8. За магнітними характеристиками машин визначити номінальні значення результуючих МРС – $F_{рез,ном}$. Оскільки обмотку збудження намотують кількістю витків, дещо більшою аніж за розрахунком, із метою компенсації поперечної реакції якоря, що розмагнічує машину, за номінальне значення МРС збудження слід прийняти

$$F_{3.\text{НОМ}} = 1,1 \cdot F_{\text{рез.НОМ}} \quad (7)$$

1.9. Номінальні струм та напруга обмоток незалежного збудження двигуна та генератора:

$$I_{3.\text{НОМ}} = \frac{F_{3.\text{НОМ}}}{w_3} \cdot a_3; \quad (8)$$

$$U_{3.\text{НОМ}} = I_{3.\text{НОМ}} \cdot r_3. \quad (9)$$

Вираз (9) повинен бути перевірений за співвідношеннями:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для двигуна } U_{3.\text{НОМ}} \approx U_3; \\ \text{для генератора } U_{3.\text{НОМ}} \approx (0,8-0,9)U_3 \end{array} \right\} \quad (10)$$

Ці співвідношення базуються на тому, що двигуни єдиної серії «П» не мають запасу збудження, а генератори – мають. Цей запас необхідний для компенсації можливих розходжень їхніх магнітних характеристик.

Якщо одержані значення за виразом (9) не задовольняють контрольні співвідношення (10), то необхідно провести коректування магнітної характеристики, оскільки прийняті раніше характеристики є лише деякими середніми значеннями родини характеристик холостого ходу [1 - 3].

1.10. Для такого коректування слід прийняти значення $U_{3.\text{НОМ}}$ за виразом (10), знову визначити за (9) $I_{3.\text{НОМ}}$, а потім за (8) – $F_{3.\text{НОМ}}$.

$\Phi \times 10^{-2}$, Вб

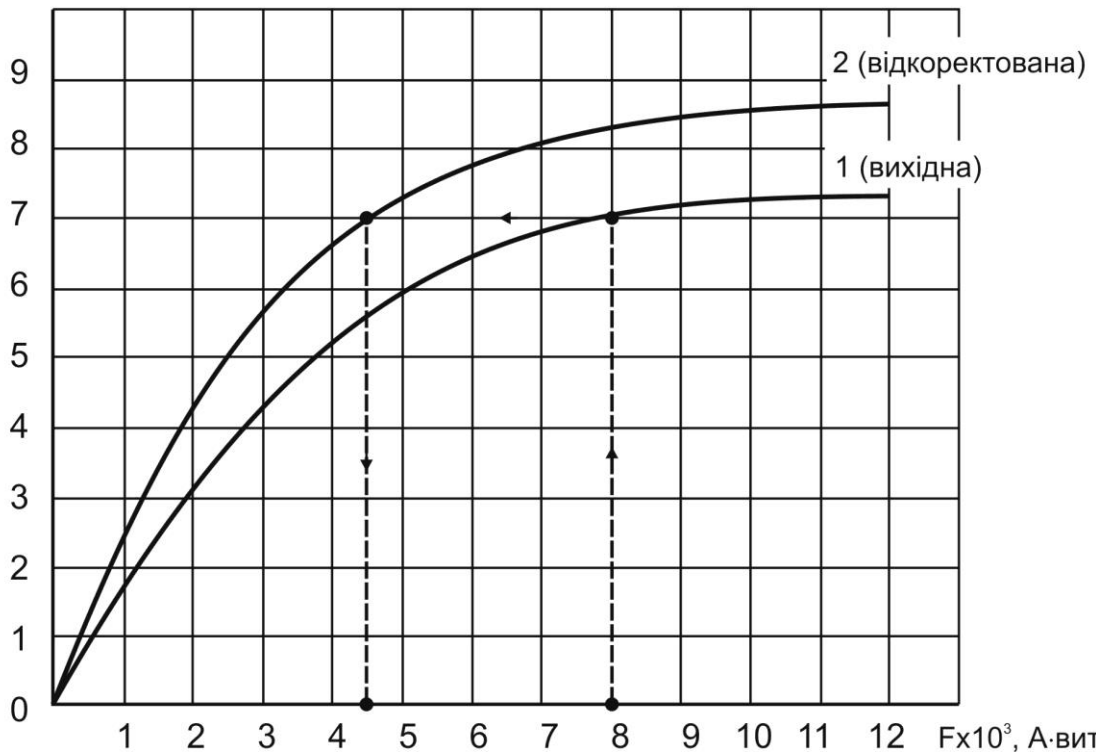


Рис. 2 Магнітні характеристики електричної машини: вихідна та корегована

Відкоректовані магнітні характеристики проводяться через точки з відкоректованими значеннями $F_{3, \text{ном}}$ і використовуються далі в усіх розрахунках. Їх орієнтовний вигляд зображений на рис. 2.

1.11. Оскільки номінальні струми та напруги двигуна і генератора відповідно не рівні, слід визначити номінальні значення ЕРС системи Г-Д, тобто ЕРС генератора, котра відповідає номінальним значенням напруги та струму двигуна:

$$E_{\Gamma\text{-д ном}} = U_{\text{д.ном}} + I_{\text{д.ном}} (r_{\text{я.}\Gamma} + r_{\text{ко.}\Gamma} + r_{\text{дп.}\Gamma}) + \Delta U_{\text{щ}}. \quad (11)$$

При цьому значенні ЕРС робиться відсічка форсування збудження генератора.

Струм збудження генератора слід визначити у такій послідовності:

$$\Phi_{\Gamma\text{-д ном}} = \frac{E_{\Gamma\text{-д ном}}}{c_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma, \text{ном}}}; \quad (12)$$

$$I_{\Gamma\text{-д ном}} = \frac{F_{\text{рез } \Gamma\text{-д ном}} \cdot a_3}{w_{3, \Gamma}}. \quad (13)$$

У виразі (13) значення МРС $F_{\text{рез } \Gamma\text{-д ном}}$ визначається за відкоректованою магнітною характеристикою генератора згідно з магнітним потоком, обчисленим за (12).

1.12. Приймавши коефіцієнт розсіювання обмотки збудження генератора $K_{\sigma} = 1,15 \dots 1,2$, визначимо індуктивність від потоку розсіювання генератора L_{σ} , який працює у системі Г-Д з МРС $F_{\text{рез } \Gamma\text{-д ном}}$, і магнітного потоку $\Phi_{\Gamma\text{-д ном}}$, котрий визначений за виразом (12)

$$L_{\sigma} = \frac{2p \cdot w_3^2}{a_3^2} \cdot \frac{\Phi_{\Gamma\text{-д ном}} \cdot (K_{\sigma} - 1)}{F_{\text{рез } \Gamma\text{-д ном}}}. \quad (14)$$

Окремо слід визначити сталу

$$K_3 = \frac{2p \cdot w_3^2}{a_3^2}. \quad (15)$$

1.13. Розрахунок індуктивності обмотки збудження генератора L_3 і побудову залежності $L_3 = f(F_{\text{рез}})$ зручно провести у такій послідовності.

Магнітна характеристика розподіляється на ряд величин (краще - однакових) $\Delta F_{\text{рез}}$ по осі абсцис, кожній з котрих відповідає прирощення магнітного потоку по осі ординат $\Delta \Phi$. Значення $\Delta F_{\text{рез.1}}, \Delta F_{\text{рез.2}} \dots \Delta F_{\text{рез.n}}$ та відповідні їм значення $\Delta \Phi_1, \Delta \Phi_2 \dots \Delta \Phi_n$ занотовуються у графі 2 і 3 табл. 1.1.

Для кожного номера ділянки знаходиться значення $\Delta\Phi/\Delta F$ і записують у графу 4 табл. 1.1.

Індуктивність обмотки збудження від основного магнітного потоку

$$L_0 = K_3 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta F} \quad (16)$$

визначається перемноженням сталої за виразом (15) на кожний рядок графі 4 і занотовується у графу 5 табл. 1.1.

Значення індуктивності обмотки збудження

$$L_3 = L_0 + L_\sigma \quad (17)$$

занотувати у графу 6. Ці індуктивності відповідають значенням результуючої МРС, записаним у графі 7. Їх визначення зрозуміло з табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	$\Delta F_{рез}$	$\Delta\Phi$	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta F_{рез}}$	L_0	L_3	$F_{рез}$
1	2	3	4	5	6	7
1	ΔF_1	$\Delta\Phi_1$	.	.	$L_{31} = L_{3.max}$	$F_{рез1} \approx \Delta F_1$
2	ΔF_2	$\Delta\Phi_2$	.	.	$L_{32} = \dots$	$F_{рез2} = F_{рез1} + \Delta F_1$
3	ΔF_3	$\Delta\Phi_3$	.	.	$L_{33} = \dots$	$F_{рез3} = F_{рез2} + \Delta F_2$
4	ΔF_4	$\Delta\Phi_4$	.	.	.	.
.
.
.	.	.	.	.	$L_{3(n-1)} = \dots$	$F_{рез(n-1)} = F_{рез(n-2)} + \Delta F_{(n-1)}$
n	ΔF_n	$\Delta\Phi_n$	.	.	$L_{3n} = L_{3.min}$	$F_{резn} = F_{рез(n-1)} + \Delta F_n$

За даними табл. 1 побудувати залежність $L_3 = f(F_{\text{рез}})$, як на рис. 3, а також визначити середнє значення індуктивності обмотки збудження

$$L_{3,\text{сер}} = \frac{L_{3,\text{max}} + L_{3,\text{min}}}{2}. \quad (18)$$

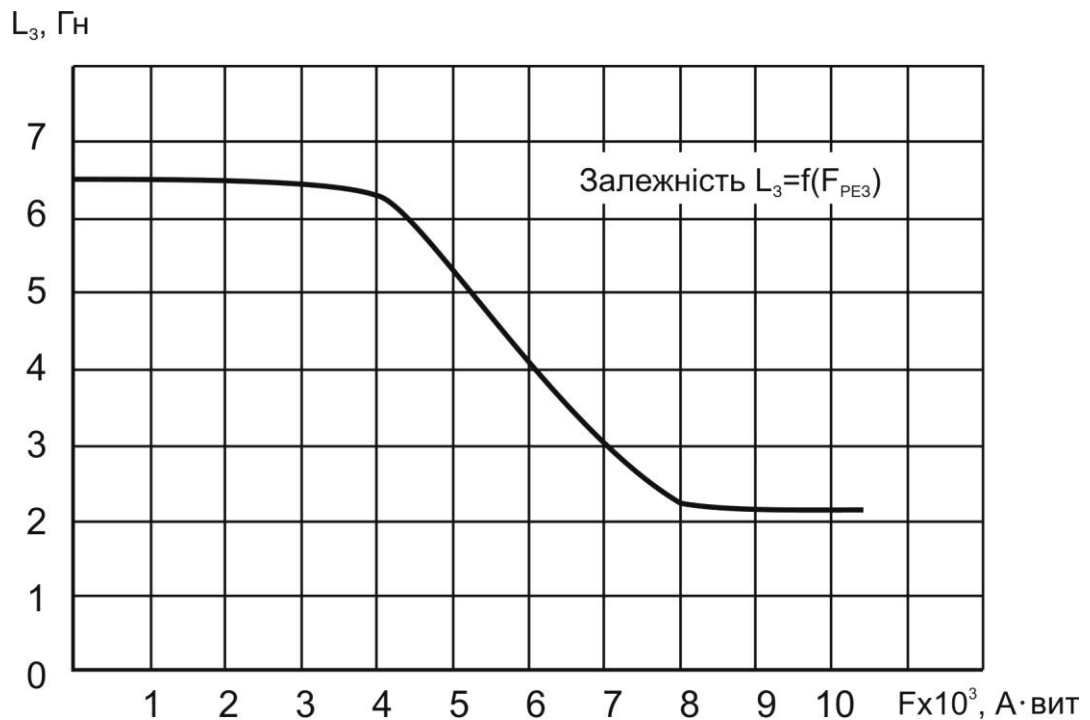


Рис. 3 залежність $L_3 = f(F_{\text{рез}})$

1.14. Оскільки на першому етапі пуску індуктивність обмотки збудження максимальна, тобто дорівнює $L_{3 \text{ max}}$, то електромагнітна стала часу обмотки збудження генератора для цього етапу [1 - 3]

$$T_{3.1} = \frac{L_{3 \text{ max}}}{r_3}, \quad (19)$$

де r_3 – опір обмотки збудження.

Для розрахунків під час реверсу і пуску (крім першого етапу) слід використовувати сталу часу T_3 за виразом (19), у котру в даному випадку підставляється значення $L_{3 \text{ сер}}$ з виразу (18).

1.15. Гальмування двигуна гасінням поля генератора робиться з використанням розрядного резистора (r_p на рис. 4), опір котрого попередньо визначається таким, щоб на обмотці збудження перенапряга не перевищувала максимально допустимої за діючим стандартом, тобто

$$r_p \leq \frac{2U_{3,\text{НОМ}} + 1000}{U_{3,\text{НОМ}}} \cdot r_3. \quad (20)$$

При цьому стала часу

$$T_{3,гал} = \frac{L_{3,сер}}{r_3 + r_p}. \quad (21)$$

1.16. Гальмування двигуна може бути проведено під час самогасіння поля генератора [1 - 3].

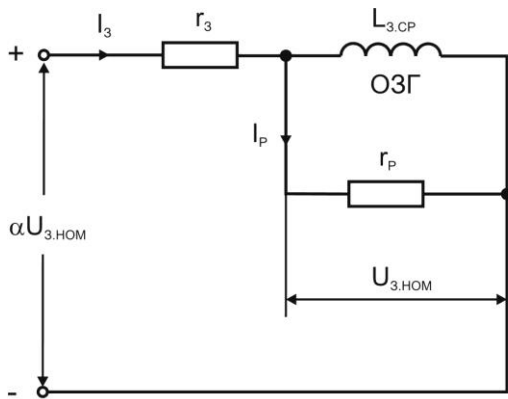


Рис. 4

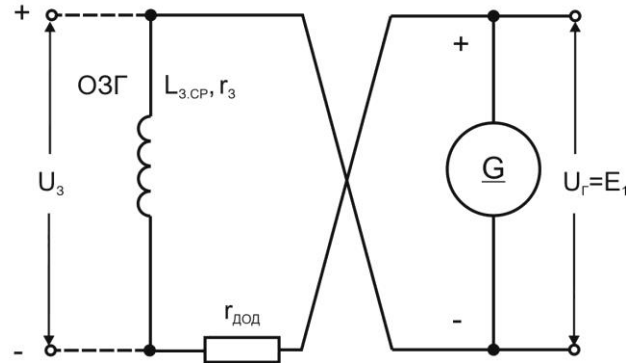


Рис. 5

У цьому випадку опір додаткового резистора ($r_{\text{доп}}$ на рис. 5) дорівнює

$$r_{\text{доп}} = r_3 \cdot \left(\frac{T_3}{T_{3,гал}} - 1 \right) - \frac{E_{\Gamma}}{I_{3,\Gamma}}, \quad (22)$$

де E_{Γ} та $I_{3,\Gamma}$ визначені відносно по (5) і (8) після коректування.

Стала часу при цьому

$$T'_{3,\Gamma} = \frac{L_{3,сер}}{r_3 + r_{\text{доп}} + \frac{E_{\Gamma}}{I_{3,\Gamma}}}. \quad (23)$$

1.17. Максимально допустимий струм системи Г-Д слід прийняти $I_{\text{max}} = 2,5 \cdot I_{\text{НОМ}}$, де $I_{\text{НОМ}}$ – струм якоря тої електричної машини, у котрої він менший за значенням.

1.18. Визначивши номінальний момент двигуна $M_{\text{д,НОМ}}$, обчислити момент статичного опору руху механізму M_c (за завданням) і тоді відповідний йому струм статичного навантаження

$$I_c = I_{\text{д,НОМ}} \cdot \frac{M_c}{M_{\text{д,НОМ}}}. \quad (24)$$

1.19. Повний опір якірного кола системи Г-Д з урахуванням опору з'єднуючих проводів (коэф. запасу 1,1)

$$R = 1,1 (r_{\text{я,Г}} + r_{\text{ко,Г}} + r_{\text{дп,Г}} + r_{\text{я,Д}} + r_{\text{ко,Д}} + r_{\text{дп,Д}} + 2\Delta U_{\text{ш}}/I_c). \quad (25)$$

Тоді з урахуванням приведенного до вала двигуна моменту інерції привода і механізму J електромеханічна стала часу усього електропривода

$$T_M = \frac{JR}{(c\Phi_{\text{ном}})_D^2}. \quad (26)$$

1.20. За приблизною емпіричною формулою для компенсованих машин слід визначити індуктивності якорів генератора та двигуна

$$L_{\text{я}} = 0,25 \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{p \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}}, \quad (27)$$

де p – кількість пар полюсів,

а потім – електромагнітну сталу часу якорного кола системи Г-Д

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я.Г}} + L_{\text{я.Д}}}{R}. \quad (28)$$

1.21. Значення максимально допустимого піка струму під час реверсу двигуна вхолосту приймається

$$I_{\text{мах.доп}} \geq I_{\text{мах}} = 2,5 I_{\text{ном}} \quad (\text{з п. 1.17}).$$

Можливо прийняти $I_{\text{мах.доп}} = (1,05 \dots 1,1) I_{\text{мах}}$, а струм короткого замикання системи Г-Д

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_{\text{Г-Д ном}}}{R}. \quad (29)$$

Оскільки

$$I_{\text{мах}} = (1 + \alpha) \cdot I_{\text{кз}} \left(\frac{T_M}{T_3} \right)^{\frac{T_3}{T_3 - T_M}},$$

то коефіцієнт форсування збудження генератора

$$\alpha = \frac{I_{\text{мах.доп}}}{I_{\text{кз}} \left(\frac{T_M}{T_3} \right)^{\frac{T_3}{T_3 - T_M}}} - 1. \quad (30)$$

1.22. Найдений за (20) опір r_p повинен бути відкоректований так, щоб при гальмуванні двигуна струм якоря не перевищував $I_{\text{мах.доп}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$. Для цього слід визначити максимум гальмівного струму

$$|I_{\text{мах.гал}}| = \left| -I_{\text{кз}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_{\text{з.гал}}} \right)^{\frac{T_{\text{з.гал}}}{T_{\text{з.гал}} - T_M}} + I_c \right| \leq | -I_{\text{мах.доп}} |, \quad (31)$$

котрий повинен бути близький за значенням до $I_{\max, \text{доп}}$.

Якщо умова (31) не додержується, слід підібрати таке значення $T_{3, \text{гал}}$ (за виразом (21)), при якому вираз (31) перетворюється у тотожність при від'ємному значенні максимально допустимого струму [1 - 3].

Потім для цього нового значення $T_{3, \text{гал}}$ необхідно остаточно визначити

$$r_p = r_3 \cdot \left(\frac{T_3}{T_{3, \text{гал}}} - 1 \right). \quad (32)$$

Для перевірки правильності одержання нового значення r_p за виразом (32) слід знову визначити $T_{3, \text{гал}}$ за виразом (21); воно повинно бути рівним тому значенню, котре перетворило вираз (31) у тотожність.

1.23. Резистор форсування r_ϕ необхідний для забезпечення пуску двигуна з коефіцієнтом α (вираз (30)) і збереженням номінального струму збудження $I_{3, \text{ном}}$ у момент відсічки форсування збудження.

Оскільки цей струм

$$I_{3, \text{ном}} = \frac{\alpha \cdot U_{3, \text{ном}}}{r_\phi + \frac{r_p \cdot r_3}{r_p + r_3}} = \frac{U_{3, \text{ном}}}{\frac{r_p \cdot r_3}{r_p + r_3}}, \text{ то}$$

$$r_\phi = \frac{r_p \cdot r_3}{r_p + r_3} (\alpha - 1). \quad (33)$$

Додатковий резистор опором $r_{\text{доп}}$ для нового значення $T_{3, \text{гал}}$ слід визначити за виразом (22).

1.24. Ідеальна кутова швидкість холостого ходу двигуна

$$\omega_0 = \frac{E_{\Gamma\text{-д ном}}}{(c\Phi_{\text{ном}})_\text{д}}. \quad (34)$$

Усталене значення кутової швидкості

$$\omega_c = \frac{(E_{\Gamma\text{-д ном}} - I_c \cdot R)}{(c\Phi_{\text{ном}})_\text{д}}. \quad (35)$$

Із виразів (34) і (35) слід визначити перепад швидкостей $\Delta\omega_c$, а також частоту обертання n_c .

2. ГРАФО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПІД ЧАС ФОРСУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ (при $\alpha > 1$) ГЕНЕРАТОРА І БЕЗ НЬОГО (при $\alpha = 1$)

2.1. Розрахунок форсованого перехідного процесу базується на рівнянні балансу напруг кола збудження генератора

$$\alpha \cdot U_{з.ном} = I_{з.сер} \cdot r_3 + L_{з.сер} \cdot \frac{dI_3}{dt}. \quad (36)$$

У цьому рівнянні безконечно малі прирощення струму збудження та часу змінюються кінцевими прирощеннями ΔI_3 і Δt .

За рівнянням (36) можливо знаходити значення Δt , якщо прийняти величину ΔI_3 .

Це дозволить провести розрахунок і побудувати залежності $I_3 = f(t)$. Визначення значень ΔI_3 треба виконувати за кривою $L_3 = f(I_{з.г})$, побудувати котру можливо за одержаною раніше залежністю $L_3 = f(F_{рез})$, яка збудована за даними табл. 1.1 і наведена на рис. 3.

2.2. Очевидно, струм збудження генератора

$$I_{з.г} = \frac{F_{рез} \cdot a_{з.г}}{w_{з.г}}. \quad (37)$$

Порядок розрахунку ясний з табл. 2.1, у котру зручно занести усі визначені величини. Для побудови залежності $L_3 = f(I_{з.г})$ необхідно використати магнітну характеристику, на якій задати 10 – 12 значень $F_{рез}$, а також криву $L_3 = f(F_{рез})$.

У табл. 2.1 $E_{Г} = E_{Г.ном} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{Г.ном}} = E_{Г-д ном} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{Г-д ном}}$.

Таблица 2.1

$F_{рез}$	А·ВИТ	500	1000	3000	...	...	...	...
Φ	Вб							
$E_{Г}$	В							
$I_{з.г}$	А							
L_3	Гн							

2.3. Побудовану за даними табл. 2.1 криву $L_3 = f(I_{3.Г})$ слід розподілити по осі абсцис на ділянки $\Delta I_{3.Г}$, для кожної з котрих знайти середнє значення струму:

$$i_{3.сер} = i_{3.поч} + \frac{\Delta I_{3.Г}}{2}, \quad (38)$$

а також відповідне цьому струму середнє значення індуктивності $L_{3.сер}$ на даній ділянці.

Із рівняння (36) випливає, що

$$\Delta t = \frac{L_{3.сер} \cdot \Delta I_{3.Г}}{\alpha \cdot U_{3.НОМ} - i_{3.сер} \cdot r_3}. \quad (39)$$

Розрахунок перехідного процесу необхідно вести до значення струму збудження, рівного $I_{3.Г-д\ н\ о\ м}$. За цього струму відбувається відсічка форсування збудження, а ЕРС дорівнює $E_{Г-д\ н\ о\ м}$. Розрахунки слід виконувати до значення α , котре визначено з (30), а також для $\alpha=1$; їх зручно виконувати у формі табл. 2.2, з якої ясний порядок розрахунку.

Таблица 2.2

№ п/п	$\Delta I_{3.Г}$	$i_{3.сер}$	$L_{3.сер}$	$i_{3.сер} \cdot r_3$	$\alpha U_{3.НОМ} - i_{3.сер} r_3$	Δt	t
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\Delta I_{3.Г}$	$\Delta I_{3.Г1}/2$	.	.	.	Δt_1	t_1
2	$\Delta I_{3.Г}$	$i_{3.поч2} + \frac{\Delta I_{3.Г2}}{2}$	.	.	.	Δt_2	t_2
3	$\Delta I_{3.Г}$	.	.	.	.	Δt_3	t_3
.
.
12	.	.	.	.	.	.	.

У табл. 2.2:

- стовбець 6 – це знаменник рівняння (39);
- стовбець 7 – величина Δt за рівнянням (39);
- час у стовбці 8 $t_1 = \Delta t_1$; $t_2 = t_1 + \Delta t_2$; $t_3 = t_2 + \Delta t_3$ і т.д.

2.4. За даними табл. 2.2 будується залежність $i_3 = f(t)$. Потім, використовуючи магнітну характеристику, яка побудована за даними табл. 2.1, необхідно побудувати залежність $E_{\Gamma} = f(t)$.

Порядок побудови цієї залежності ясний з рис. 6, на котрому як приклад за вихідну прийнята точка А і побудована точка В.

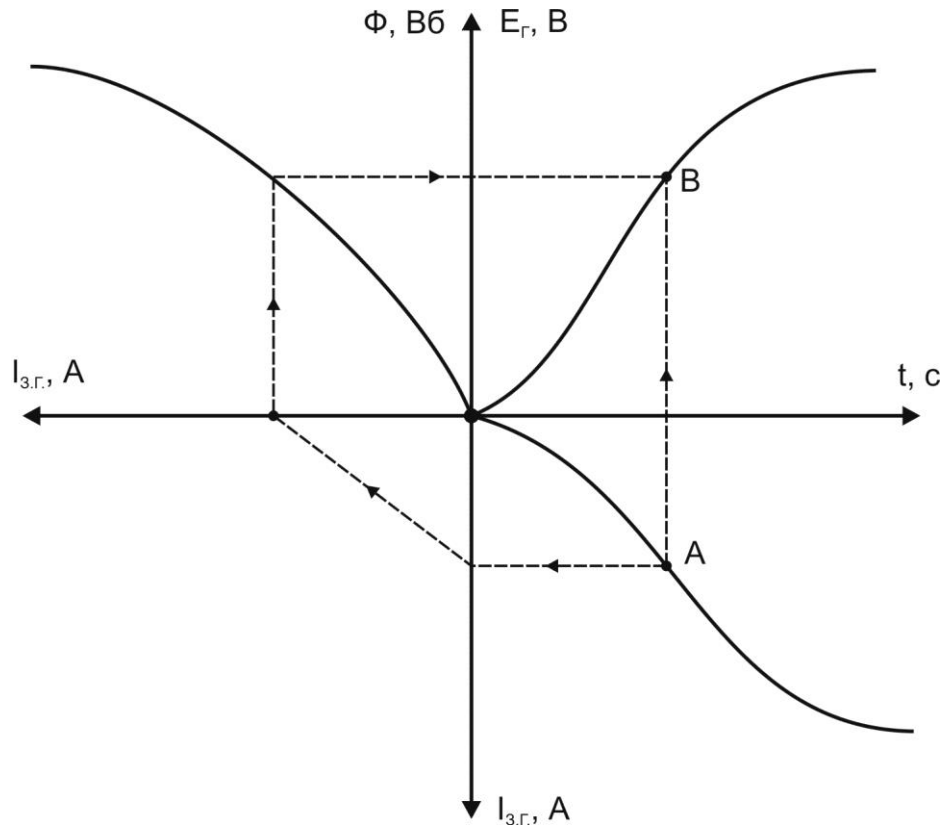


Рис. 6 Залежність $E_{\Gamma} = f(t)$

Зауваження. Побудувавши залежності $E_{\Gamma} = f(t)$ для обох значень α , слід зробити висновок про ефективність процесу форсування збудження, порівнявши час відсічки форсування з часом досягнення $I_{3,\Gamma-д ном}$ при $\alpha=1$.

2.5. Розрахувати та побудувати зовнішню характеристику генератора за номінальним магнітним потоком, визначеним за виразом (12), а також природні електромеханічну і механічну характеристики двигуна.

3. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПУСКУ ДВИГУНА З НАВАНТАЖЕННЯМ І ВХОЛОСТУ

3.1. Загальні положення. Якщо прийняти генератор ненасиченим, то його ЕРС при $\omega_{\Gamma} = \text{const}$ пропорційна струму збудження і у перехідних режимах визначається рівнянням [1 - 3]

$$e_{\Gamma} = \alpha \cdot E_{\Gamma\text{-д ном}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right),$$

де $E_{\Gamma\text{-д ном}}$ визначено за виразом (11).

Для кола якоря двигуна, у котрому проходить струм i , під час пуску рівняння рівноваги має вигляд

$$\alpha E_{\Gamma\text{-д ном}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) = iR + L_{\text{яя}} \frac{di}{dt} + e_{\text{д}}, \quad (40)$$

де R – опір за рівнянням (25);

$e_{\text{д}} = c\omega$ – ЕРС двигуна за сталим магнітним потоком;

$L_{\text{яя}}$ – індуктивність кола якорів двигуна та генератора; якщо вона ду-

же мала, можливо прийняти $L_{\text{яя}} \frac{di}{dt} = 0$.

Рівняння руху привода за сталим магнітним потоком

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = ci, \quad (41)$$

де $M_c = cI_c$.

Для одержання залежностей, які визначають зміни ω , та M під час пуску двигуна необхідно вирішити систему рівнянь (40) і (41), у результаті чого одержимо:

$$\omega = (\alpha\omega_0 - \Delta\omega_c) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + \alpha\omega_0 \cdot \frac{T_3}{T_3 - T_M} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_M}} - e^{-\frac{t}{T_3}} \right), \quad (42)$$

$$i = I_c + \alpha I_{\text{кз}} \cdot \frac{T_M}{T_3 - T_M} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_3}} - \frac{T_3}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + \frac{I_{\text{кз}}}{\omega_0} \cdot (\alpha\omega_0 - \Delta\omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (43)$$

Потрібно мати на увазі, що під час пуску двигуна вхолосту ($M_c = 0$) у виразах (42) та (43) $I_c = 0$ і $\Delta\omega_c = 0$. Слід зазначити, що у виразах (42) та (43) $t = 0$ відповідає моменту початку руху t_3 за рівнянням (44), а не моменту подачі напруги на обмотку збудження.

3.2. За рівняннями (42) і (43) слід виконати розрахунки під навантаженням та вхолосту з форсуванням збудження. За результатами розрахунків побудуйте графіки залежностей $\omega = f(t)$ та $i = f(t)$. Порівняйте ці залежності та зробіть висновки.

Для розрахунку пуску двигуна у системі Г-Д під час форсування збудження слід мати на увазі, що пуск здійснюється у три етапи.

Перший етап відповідає часовому інтервалу від $t=0$ до $t=t_3$, котрий називають часом запізнення. На цьому етапі струм починає рости, а ротор ще не обертається:

$$t_3 = T_{31} \cdot \ln \frac{\alpha \cdot I_{КЗ}}{\alpha \cdot I_{КЗ} - I_c} \quad (44)$$

Аналізуючи графіки залежностей $L_3 = f(t)$ та $I_{3,Г} = f(t)$, треба визначити кількісні співвідношення індуктивності, струму та часу. Цей аналіз виявив, що у початковий момент пуску індуктивність обмотки збудження максимальна і у рівняння слід підставляти сталу часу, визначену за (19). Потім значення T_3 зменшиться і буде відповідати $L_{3,сер}$.

Визначаючи струм з рівняння (40), слід пам'ятати, що на цьому етапі $\omega=0$.

Другий етап відповідає часовому інтервалу від початку обертання ротора t_3 до часу відсічки форсування збудження, котре дорівнює

$$t_{відс} = T_3 \cdot \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad (45)$$

Цей час можливо визначити за графіком залежності $I_{3,Г} = f(t)$. Порівняйте ці значення.

Використовуючи рівняння (42) і (43), слід зважати на початкові умови:

значення струму та ЕРС у момент часу t_3 , тобто $I_{поч} = I_c$,

$$\Delta\omega_{поч} = \alpha\omega_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_{31}}} \right) \text{ та усталений перепад швидкостей } \Delta\omega_c = \frac{I_c R}{(c\Phi_{ном})_Д}$$

Тоді рівняння (42) і (43) перетворюються:

$$\omega = \alpha\omega_0 - \Delta\omega_c - (\Delta\omega_{поч} - \Delta\omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + \frac{\alpha\omega_0 e^{-\frac{t_3}{T_{31}}}}{T_3 - T_M} \cdot \left(T_M \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} - T_3 \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} \right), \quad (42, a)$$

$$i = I_c + (I_{поч} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + \frac{\alpha \cdot I_{КЗ} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_{31}}} \cdot T_M}{T_3 - T_M} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right). \quad (43, a)$$

Диференціюючи рівняння струму (43а) та прирівнявши першу похідну до нуля, одержимо час, коли струм максимальний:

$$t_{\max} = \frac{T_M \cdot T_3}{T_3 - T_M} \cdot \ln \frac{\alpha \cdot I_{K3} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_{31}}} \cdot T_M \cdot T_3 - (I_{\text{поч}} - I_c) \cdot (T_3 - T_M) \cdot T_3}{\alpha \cdot I_{K3} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_{31}}} \cdot T_M^2}. \quad (45, a)$$

Якщо $I_{\text{поч}} = I_c$, то

$$t_{\max} = \frac{T_M \cdot T_3}{T_3 - T_M} \cdot \ln \frac{T_3}{T_M}. \quad (45, б)$$

Третій етап відповідає часу від початку відсічки $t_{\text{відс}}$ (коли $\alpha=1$) до безконечності, тобто до моменту часу, коли настає сталий режим.

На цьому етапі вмикається резистор опором r_ϕ , значення котрого визначено за (33); через те стала часу

$$T_3 = \frac{L_3}{r_\phi + r_3}.$$

Рівняння для струму та кутової швидкості мають вигляд:

$$i = I_c + (I_{\text{поч}} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_0 + \Delta\omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

де $I_{\text{поч}}$ і $\omega_{\text{поч}}$ – відповідно значення струму та швидкості у момент часу відсічки $t_{\text{відс}}$ [1 - 3].

Увага! У всі розрахункові формули слід підставляти час t , що відповідає своєму етапу.

3.3. На завершення розрахунку процесу пуску за навантаженням слід визначити значення максимуму пускового струму $I_{\text{п.мах}}$ і час його досягнення. Зробіть висновок про припущення такого пуску, порівнявши $I_{\text{п.мах}}$ з $I_{\text{мах доп}}$ за п. 1.21.

3.4. Аналогічно слід провести розрахунок пуску з навантаженням, але без форсування збудження, тобто при $\alpha=1$.

Процес такого пуску, як і при $\alpha>1$, перебігає за три етапи. Розрахуйте і побудуйте залежності $\omega=f(t)$ та $i=f(t)$, а також порівняйте їх з залежностями за п. 3.2. Зробіть висновок з такого порівняння.

3.5. Виконайте розрахунок пуску вхолосту, тобто без навантаження, але з використанням форсування збудження. Розрахуйте та побудуйте залежності $\omega=f(t)$ та $i=f(t)$. Розрахунок також має три етапи.

4. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС НАКИДАННЯ ТА СКИДАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

4.1. Загальні положення. При розрахунку перехідних процесів слід мати на увазі, що обидва процеси – електромагнітний та електромеханічний – протікають сумісно, складаючи єдиний процес, котрий описується системою лінійних диференційних рівнянь другого порядку [1 - 3]:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{1}{T_{\text{я}}} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega - \omega_{\text{с}}}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}} = 0, \quad (46)$$

$$\frac{d^2M}{dt^2} + \frac{1}{T_{\text{я}}} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{M - M_{\text{с}}}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}} = 0. \quad (47)$$

Із рівняння (47) випливає рішення рівняння для струму.
Рішення цих рівнянь має вигляд [1 - 3]:

$$\omega = \omega_{\text{с}} + A_1 \cdot e^{\alpha_1 t} + B_1 e^{\alpha_2 t}, \quad (48)$$

$$M = M_{\text{с}} + (A_2 e^{\alpha_1 t} + B_2 e^{\alpha_2 t}) \cdot J, \quad (49, a)$$

$$i = I_{\text{с}} + (A_3 e^{\alpha_1 t} + B_3 e^{\alpha_2 t}) \cdot \frac{J}{c}. \quad (49, б)$$

У рівняннях (48) та (49) А і В – сталі інтегрування, котрі визначаються початковими умовами при накиданні та скиданні навантаження. Величини α_1 та α_2 є коренями характеристичного рівняння

$$\alpha^2 + \frac{1}{T_{\text{я}}} \cdot \alpha + \frac{1}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}} = 0, \text{ тоді}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot T_{\text{я}}} \cdot \left(1 \mp \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{я}}}{T_{\text{м}}}} \right). \quad (50)$$

Розв'язок рівняння (50) залежить від індивідуальних параметрів електропривода:

– якщо відношення $T_{\text{м}}/T_{\text{я}} = m > 4$, то корені рівняння α_1 та α_2 мають дійсні від'ємні значення. Визначивши їх, запишіть диференційне рівняння та знайдіть сталі інтегрування, котрі необхідні для чисельного розв'язку. Скористуйтеся рівняннями [1, с. 274];

– якщо відношення $T_{\text{м}}/T_{\text{я}} = m < 4$, то корені рівняння α_1 та α_2 є комплексні числа

$$\alpha_{1,2} = a \pm j\Omega, \quad (51)$$

$$\text{де } a = -\frac{1}{2 \cdot T_{\text{я}}}; \quad \Omega = \frac{\sqrt{4 \cdot m - m^2}}{2 \cdot T_{\text{я}}}.$$

Підставивши (51) у (48) та (49) і виконавши перетворення за допомогою формули Ейлера ($e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$), а також знайшовши сталі інтегрування, одержимо рівняння для кутової швидкості та струму:

$$\omega = \omega_c + e^{at} \left[(\omega_{\text{поч}} - \omega_c) \cos \Omega t + \frac{M_{\text{поч}} - M_c - Ja(\omega_{\text{поч}} - \omega_c)}{J\Omega} \cdot \sin \Omega t \right], \quad (52)$$

$$i = I_c + e^{at} \cdot \left[(I_{\text{поч}} - I_c) \cdot \cos \Omega t - \frac{a \cdot (I_{\text{поч}} - I_c)}{\Omega} \cdot \sin \Omega t \right]. \quad (53)$$

Рівняння для моменту аналогічно (53).

Для знаходження сталих інтегрування скористуйтеся [2, с. 195-196].

4.2. Початкові умови при $t=0$ такі: $\omega = \omega_{\text{поч}}, I = I_{\text{поч}}$. Тоді

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{t=0} = \frac{(I_{\text{поч}} - I_{\text{уст}}) \cdot c\Phi}{J} = \frac{M_{\text{поч}} - M_{\text{уст}}}{J} = \frac{\Delta\omega_{\text{поч}} - \Delta\omega_{\text{уст}}}{T_{\text{м}}}. \quad (54)$$

Далі слід скористуватися рівняннями (48) та (49), і диференціюючи їх за часом, визначити сталі А та В для кутової швидкості, струму і моменту. Очевидно, якщо $t=0$, то $\frac{di}{dt} = 0$.

4.3. За початкові умови у разі **накидання** навантаження слід прийняти: $I_{\text{поч}} = 0,05 I_{\text{ном}} = I_{\text{хх}}, \omega_{\text{поч}} = \omega_{\text{хх}}$, котра відповідає струму $I_{\text{хх}}$ за електро механічною характеристикою; сталі значення $\omega_{\text{уст}} = \omega_c, I_{\text{уст}} = I_c$.

Перепади швидкостей:

$$\Delta\omega_{\text{поч}} = \frac{R \cdot I_{\text{поч}}}{c\Phi}, \quad \Delta\omega_{\text{уст}} = \frac{R \cdot I_{\text{уст}}}{c\Phi},$$

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{t=0} < 0.$$

Жорсткість характеристики

$$\beta = \frac{M_{\text{поч}} - M_c}{\omega_{\text{поч}} - \omega_c}.$$

4.4. За початкові умови у разі **скидання** навантаження слід прийняти: $I_{\text{поч}} = I_c, \omega_{\text{поч}} = \omega_c, I_{\text{уст}} = I_{\text{хх}}, \omega_{\text{уст}} = \omega_{\text{хх}}, \Delta\omega_{\text{поч}} = \Delta\omega_c = \frac{RI_c}{c\Phi}, \Delta\omega_{\text{уст}} = \frac{RI_{\text{хх}}}{c\Phi};$

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{t=0} > 0.$$

4.5. Результати усіх розрахунків звести у таблиці, приймаючи значення часу від 0,001 до 1,0 с. За результатами розрахунків накидання та скидання навантаження побудувати залежності $\omega=f(t)$, $M=f(t)$, $\omega=f(M)$.

Зробити висновки про характер перехідних процесів, наявність або відсутність коливань.

5. ПОБУДОВА НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ДІАГРАМИ

5.1. Навантажувальна діаграма будується у координатах I-t з використанням результатів розрахунків перехідних режимів. Прийняти, що двигун навантажений реактивним моментом опору. За побудованою навантажувальною діаграмою визначить фактичний час роботи двигуна (час циклу $t_{\text{ц}}$) та режим навантаження.

5.2. Побудуйте навантажувальну діаграму, котра містить такі ділянки:

- 1 – пуск двигуна та вихід на номінальне навантаження;
- 2 – робота з номінальним струмом у перебігу 4...7 с (за завданням);
- 3 – скидання навантаження до струму холостого ходу;
- 4 – робота за струмом $I_{\text{хх}}$ у перебігу 2 с.
- 5 – накидання навантаження від струму $I_{\text{хх}}$ до струму $I_{\text{с}}=1,2 \cdot I_{\text{ном}}$;
- 6 – робота за струмом $I_{\text{с}}=1,2 \cdot I_{\text{ном}}$ у перебігу 3...5 с (за завданням);
- 7 – скидання навантаження до струму $I_{\text{хх}}$ і вимикання двигуна (струм $I=0$); на цій ділянці можливо використати **режим гальмування, розрахуйте його**;
- 8 – пауза (струм $I=0$) у перебігу $t_0=3$ с, після чого цикл повторюється.

6. ПЕРЕВІРКА ДВИГУНА ЗА НАГРІВОМ

6.1. Оскільки навантажувальна діаграма побудована у координатах I-t, перевірку двигуна за нагрівом слід виконувати методом еквівалентного струму. Використаний двигун має самовентиляцію, тому слід ураховувати погіршення умов охолодження, прийнявши коефіцієнт $\beta_0=0,3$ за час паузи, пуску та гальмування, а також визначити коефіцієнт втрат $\alpha'=p_0/p_{\text{мном}}$ (p_0 – сталі витрати у номінальному режимі; $p_{\text{мном}}$ – зміни втрати у номінальному режимі, пропорційні квадрату струму).

6.2. Одержане значення еквівалентного струму слід порівняти з номінальним струмом: $I_{\text{екв}} \leq I_{\text{ном}}$.

Оскільки, як видно з навантажувальної діаграми, двигун працює у режимі повторного вмикання – ПВ, слід урахувати і цю обставину.

Зробити висновок про придатність двигуна для завданого режиму; якщо потрібно, відкоригуйте режим.

7. РОЗРАХУНОК ДОПУСТИМОЇ КІЛЬКОСТІ УМИКАНЬ ДВИГУНА ЗА ГОДИНУ

7.1. Допустима кількість умикань за годину

$$Z = \frac{3600}{t_{\text{ц}}} \cdot m = \frac{3600}{t_{\text{вмик}}} \cdot m \cdot \xi, \quad (55)$$

де m – кількість умикань двигуна за один цикл;

ξ – відносна тривалість умикань двигуна;

$t_{\text{вмик}}$ – час вмикання за один цикл.

Можливо приблизно рахувати, що при $\beta_0 = 1$:

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЕКВ}} \cdot \sqrt{\xi} \quad \text{або} \quad (56, a)$$

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{\xi}{1 + \alpha' \cdot (1 - \xi)}}. \quad (56, б)$$

Якщо $\beta_0 \neq 1$, то

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЕКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\xi}{\xi + \beta_0 \cdot (1 + \alpha') \cdot (1 - \xi)}}. \quad (56, в)$$

7.2. У вираз (56-58) підставляйте такі значення $t_{\text{вмик}}$ та ξ , за котрими двигун працює (за завданою навантажувальною діаграмою) з максимально допустимим перегрівом. Для цього знайдіть таке значення ξ , за котрим вирази (56) перетворюються у рівності.

Тоді, наприклад, з (56, б)

$$\xi = \frac{\alpha' + 1}{\alpha' + \left(\frac{I_{\text{ЕКВ}}}{I_{\text{НОМ}}}\right)^2}. \quad (57)$$

Підставивши (57) у (55), одержимо:

$$Z = \frac{3600 \cdot m}{t_{\text{вмик}}} \cdot \frac{\alpha' + 1}{\alpha' + \left(\frac{I_{\text{ЕКВ}}}{I_{\text{НОМ}}}\right)^2}. \quad (58)$$

Якщо визначити ξ з виразів (56, а) або (56, в), рівняння (57) та відповідно (58) будуть іншими.

Значення $t_{\text{вмик}}$ необхідно відкоригувати з урахування умов погіршення охолодження, тобто

$$t_{\text{вмик}} = \frac{1+\beta_0}{2} \cdot (t_{\text{пуск}} + t_{\text{гальм}}) + t_{\text{стал}}.$$

Відкоригуйте (за необхідності) час паузи t_0 так, щоб двигун повністю використовувався за нагрівом.

8. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТЕЙ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА, ЗБУДЖУВАЧІВ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА І ГЕНЕРАТОРА ТА ВИБІР ЇХ ТИПІВ

8.1. Частота обертання привідного двигуна для генератора повинна відповідати номінальній частоті обертання генератора, а його потужність з 10 % запасу

$$P_{\text{пд.г}} = 1,1 \cdot \frac{P_{\text{г.ном}}}{\eta_{\text{г}}}, \quad (59)$$

де $\eta_{\text{г}}$ – номінальне значення ККД генератора, котре можливо прийняти однаковим з ККД головного двигуна за виразом (1).

Тип приводного двигуна (синхронного або асинхронного), його номінальні параметри і конструктивне виконання обґрунтуйте у розрахунково-пояснювальній записці.

8.2. Потужність збудника генератора

$$P_{\text{з.г}} \approx \alpha U_{\text{з.г-д ном}} \cdot I_{\text{з.г-д ном}}. \quad (60)$$

Його номінальні параметри повинні забезпечити форсування збудження у перехідних режимах.

Також обґрунтуйте прийнятий тип збудника. Якщо збудник приводиться в обертання від гуртового приводного двигуна, скоректуйте вираз (59) з урахуванням (60).

Привод збудника, якщо неможливе сполучення з гуртовим валом, здійснюйте за допомогою редуктора або клиноремінної передачі. Обґрунтуйте цей вибір і зробіть спрощений розрахунок передачі з вибором її основних елементів та визначенням головних розмірів.

8.3. Вибір збудника головного двигуна робиться аналогічно; урахуйте його потужність у п. 8.1.

9. ВИСНОВКИ

У кінцевий розділ включіть такі запитання:

- ступінь завантаження двигуна струмом та рекомендації до зміни режиму роботи (за необхідністю);
- висновки про роботу двигуна і описання фізичних явищ у перехідних режимах;
- висновок про придатність двигуна з заданою номінальною тривалою потужністю для роботи у режимі ПВ;
- обґрунтування та пояснення вибору машин у розділі 8.

10. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА ПРОЕКТУ

Ця частина містить у собі компоновку усіх електричних машин на фундаментній плиті з усіма габаритними та монтажними розмірами у двох проєкціях. На кресленні повинні бути пророблені вузли кріплення електричних машин на плиті. Можливо установа збудників за типом «наїзник».

Приводяться основні конструктивні матеріали, з котрих виготовлена фундаментна плита, для цього роблять відповідні вириви і зноски на кресленні.

Зауваження. Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та креслення повинні відповідати вимогам ЄСКД.

Додаток 1

Технічні дані компенсованих електродвигунів єдиної серії П 13, 14 та 15 габаритів;
 $I_{\max}/I_{\text{н}} = 2,5$; $a_3 = 2$; $U_3 = 110 \text{ В}$

№ пор.	Тип дви-гуна	P _н , кВт	U _н , В	I _н , А	n _н , хв ⁻¹	2р	Обмотка якоря			I _{кв} при 20°С, Ом	I _{дл} при 20°С, Ом	Обмотка збудження		Номер додатка за магн. харак.	I _Г =GD/4 кг·м ²
							2а	N=2w _я	I _я при 20°С, Ом			w ₃ на полюс	I ₃ при 20°С, Ом		
1	П132	125	44	310	500	4	2	378	0,045	0,019	0,00835	760	4,59	3,2	18,25
2	П132	“	22	624	“	“	4	372	0,011	0,00474	0,00208	677	3,64	“	18,5
3	П133	“	44	313	400	“	2	378	0,0494	0,0212	0,0103	“	4,08	“	21,5
4	П133	“	22	630	“	“	4	372	0,0121	0,00535	0,00258	“	“	“	21,75
5	П133	160	44	393	500	“	2	270	0,0279	0,0127	0,00535	639	3,38	“	21,5
6	П133	“	22	795	“	“	4	276	0,0071	0,00318	0,00133	677	4,08	“	23
7	П142	125	44	318	300	“	2	462	0,06	0,0268	0,0088	641	2,62	“	37,5
8	П142	“	22	640	“	“	4	464	0,0151	0,0067	0,00216	660	3,07	“	38,75
9	П142	160	44	398	400	“	2	342	0,0359	0,0178	0,00485	695	3,65	“	37,5
10	П142	“	22	815	“	“	4	348	0,00895	0,00665	0,0012	“	“	“	38,75
11	П142	200	44	495	500	“	“	592	0,02545	0,01543	0,00362	660	3,07	“	37,5
12	П142	“	22	1000	“	“	“	296	0,00636	0,00385	0,000905	“	“	“	48,75
13	П143	160	44	402	300	“	2	342	0,0391	0,0197	0,00594	614	2,92	“	43,75
14	П143	“	22	820	“	“	4	348	0,00973	0,0071	0,00148	660	3,48	“	46,25
15	П143	200	44	497	400	“	“	592	0,0276	0,0166	0,00443	650	3,9	“	43,75

Продовження додатка І

№ пор.	Тип двигуна	P _н , кВт	U _н , В	I _н , А	n _н , хв ⁻¹	2р	Обмотка якоря			r _{ко} при 20°С, Ом	r _{лп} при 20°С, Ом	Обмотка збудження		Номер додатка за магн. харак	J _н =GD/4 кг·м ²
							2а	N=2W _я	r _я при 20°С, Ом			w _з на полюс	r _з при 20°С, Ом		
16	П143	200	220	1000	400	4	4	296	0,006	0,004	0,0011	650	3,9	3,2	56,25
17	П143	250	440	612	500	“	4	464	0,016	0,007	0,0027	660	3,48	“	46,25
18	П143	“	220	1240	“	“	4	232	0,004	0,002	0,0006	650	3,9	“	56,25
19	П151	200	440	506	300	6	2	392	0,031	0,019	0,0058	528	2,88	3,3	88,75
20	П151	“	220	1020	“	“	6	660	0,007	0,004	0,0016	“	“	“	95,75
21	П151	250	440	622	400	4	4	592	0,017	0,011	0,0029	497	2,39	“	88,75
22	П151	“	220	1270	“	6	6	486	0,005	0,003	0,0008	494	3,0	“	95,75
23	П151	320	440	788	500	“	“	696	0,012	0,006	0,0019	460	1,86	“	88,75
24	П151	“	220	1580	“	“	“	348	0,003	0,001	0,0005	“	“	“	95,75
25	П152	250	440	622	300	4	4	592	0,019	0,012	0,0034	450	1,7	“	101,2
26	П152	“	220	1270	“	6	6	486	0,005	0,004	0,0009	440	2,34	“	105,5
27	П152	320	440	790	400	“	“	696	0,013	0,007	0,0024	460	2,1	“	101,2
28	П152	“	220	1587	“	“	“	348	0,003	0,001	0,0006	“	“	“	105,5
29	П153	“	440	794	300	“	“	696	0,014	0,007	0,0029	360	1,475	“	120,7
30	П153	“	220	1592	“	“	“	348	0,003	0,001	0,0007	“	“	“	125,5

Додаток 2

Технічні дані компенсованих генераторів єдиної серії П 13 та 14 габаритів;

$n = 1000$ об/хв; $I_{\max}/I_N = 2,5$; $2p = 4$; $U_3 = 110$ В; $a_3 = 2$.

Магнітні характеристики генераторів дані у дод. 3.1.

Тип генератора	P_N , кВт	U_N , В	I_N , А	Обмотка якоря			$\Gamma_{ко}$ при 20°C, Ом	$\Gamma_{лп}$ при 20°C, Ом	Обмотка збудження	
				2а	$N=2 w_{я}$	$\Gamma_{я}$ при 20°C, Ом			w_3 на полюс	Γ_3 при 20°C, Ом
П131-4К	200	460	435	2	270	0,0234	0,0153	0,0036	730	4,15
П131-8К	“	230	870	4	276	0,00593	0,00257	0,000896	“	“
П141-6К	300	460	652	“	464	0,0141	0,00619	0,001905	728	4,04
П141-8К	“	230	1304	“	232	0,0034	0,00263	0,0043	730	4,56
П142-6К	400	460	870	“	348	0,00895	0,00665	0,001197	660	4,2
П142-12К	“	230	1740	8	“	0,00223	0,00166	0,0003	“	“

Додаток 3.1

Магнітні характеристики компенсованих генераторів єдиної
серії П 13 та 14 габаритів

	$F_{рез} \times 10^3$ А·вит	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ФХ10 ⁻² В·с	П131	1	2,1	3,15	4,2	4,8	5,25	5,6	5,8	6,1	-	-	-	-	-
	П141- 6К	1,14	2,3	3,6	4,68	5,46	6,05	6,4	6,65	6,83	6,95	7,05	7,15	7,25	7,35
	П141- 9К	1,49	2,9	4,2	5,2	5,9	6,3	6,7	6,85	7,0	7,1	7,15	7,2	-	-
	П142	2	3,9	5,8	7,05	8,0	8,6	9,0	9,2	9,25	9,3	9,35	9,4	-	-

Зауваження. розмірність 1 Вб = 1 В·с.

Додаток 3.2

Магнітні характеристики компенсованих електродвигунів єдиної
серії П 13 та 14 габаритів

	$F_{рез} \times 10^3$ А·вит	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ФХ10 ⁻² В·с	П132	1,16	2,25	3,52	4,75	5,6	6,25	6,78	7,15	7,5	7,6	7,8	-
	П133	1,5	2,9	4,52	6,1	7,2	8,05	8,7	9,2	9,65	9,75	10,0	-
	П142	1,32	2,63	3,97	5,32	6,57	7,42	7,95	8,3	8,42	8,85	9,0	9,1
	П143	1,75	3,5	5,3	7,1	8,75	9,9	10,6	11,1	11,5	11,8	12,0	12,1

Додаток 3.3

Магнітні характеристики компенсованих електродвигунів єдиної
серії П 15 габариту

	$F_{рез} \times 10^3$ А·вит	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5
ФХ10 ⁻² В·с	П151	1,7	3,6	5,2	6,14	6,68	7,1	7,35	7,55	7,7	7,8	7,85
	П152	2,12	4,5	6,5	7,65	8,35	8,85	9,15	9,4	9,6	9,75	9,8
	П153	2,85	6,0	8,7	10,15	11,5	11,85	12,3	12,6	12,83	13,0	13,1

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. * Колб Ант. А. Теорія електроприводу: [навчальний посібник] / Ант. А. Колб, А.А. Колб – [2-е вид. перероб. і допов.]. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – 540с.
2. * Теорія електропривода: Підручник / [Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилюк В.А. та ін.]; за ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494с.
3. * Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів: [підручник] / А.Б. Зеленов. – Луганськ: вид-во «Ноулідж», 2010.– 670 с.

* - остання редакція базового видання

Навчально-методичне видання

Устименко Дмитро Володимирович
Балійчук Олексій Юрійович

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Навчально-методичні рекомендації
до виконання курсового проекту

Електронне видання

Експертний висновок склав кандидат техн. наук, доцент
Оксана МАРЕНИЧ

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.845 від 04.11.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка О. Ю. Балійчук

Формат 60x84^{1/16}. Ум. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 1,88.
Зам. №129

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010