

М. П. Розводюк, Є. Я. Блінкін

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

**(Електричні машини, основи
електропривода, електрозабезпечення,
електроніка)**

**Контрольні та розрахунково-графічні
роботи для студентів неелектротехнічних
спеціальностей**



Вінницький національний технічний університет, 2010

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. П. Розводюк, Є. Я. Блінкін

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
(Електричні машини, основи електропривода,
електрозабезпечення, електроніка)

Контрольні та розрахунково-графічні
роботи для студентів неелектротехнічних
спеціальностей

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.3(075)

ББК 31.2я73

Р64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №4 від 16.11.2009 р.)

Рецензенти:

Б. С. Рогальський, доктор технічних наук, професор

В. Г. Мадьяров, кандидат технічних наук, доцент

Т. В. Коренькова, кандидат технічних наук, доцент

Розводюк, М. П.

Р64 Електротехніка (Електричні машини, основи електропривода, електрозабезпечення, електроніка). Контрольні та розрахунково-графічні роботи для студентів неелектротехнічних спеціальностей : навчальний посібник / М. П. Розводюк, Є. Я. Блінкін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 144 с.

Запропонований навчальний посібник охоплює основні питання для закріплення теоретичних знань з дисциплін „Електротехніка”, „Електротехніка в будівництві”, „Теоретичні основи електротехніки”, „Електротехніка та електроніка” для неелектротехнічних спеціальностей. Навчальний посібник рекомендується для студентів, які навчаються за напрямками підготовки „Інженерна механіка”, „Зварювання”, „Енергетика”, „Будівництво”

УДК 621.3(075)

ББК 31.2я73

Зміст

Вступ	6
Загальні методичні вказівки.....	7
1 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	9
1.1 Трансформатори.....	9
1.1.1 Загальні відомості	9
1.1.1.1 Трифазні трансформатори	13
1.1.1.2 Автотрансформатори.....	15
1.1.1.3 Вимірювальні трансформатори	16
1.1.2 Приклади розв'язування задач	17
1.1.3 Запитання для самоперевірки	20
1.1.4 Контрольні задачі.....	21
1.2 Асинхронні машини.....	28
1.2.1 Загальні відомості	28
1.2.2 Приклади розв'язування задач	34
1.2.3 Запитання для самоперевірки	37
1.2.4 Контрольні задачі.....	38
1.3 Електричні машини постійного струму.....	44
1.3.1 Загальні відомості	44
1.3.2 Приклади розв'язування задач	50
1.3.3 Запитання для самоперевірки	55
1.3.4 Контрольні задачі.....	56
2 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	59
2.1 Загальні відомості	59
2.1.1 Вибір двигуна за потужністю для тривалого режиму роботи...59	
2.1.1.1 Метод середніх втрат.....	60
2.1.1.2 Метод еквівалентних величин	60
2.1.2 Вибір електродвигуна за потужністю для короткочасного режиму роботи	61
2.1.3 Вибір електродвигуна за потужністю для повторно-короткочасного режиму роботи	62
2.2 Приклади розв'язування задач	65

2.3	Запитання для самоперевірки	69
2.4	Контрольні задачі.....	69
3	ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	73
3.1	Загальні відомості	73
3.1.1	Лінії електропередач.....	73
3.1.2	Захист проводів електричних мереж від дії струмів короткого замикання.....	77
3.1.3	Вибір плавких вставок запобіжників і переріз проводів та кабелів за умовами нагріву	77
3.2	Приклади розв'язування задач	80
3.3	Запитання для самоперевірки	90
3.4	Контрольні задачі.....	91
4	ЕЛЕКТРОНІКА	94
4.1	Електронні випрямлячі.....	94
4.1.1	Однофазні випрямлячі.....	95
4.1.1.1	Однопівперіодна схема випрямлення.....	96
4.1.1.2	Двопівперіодна (мостова) схема випрямлення.....	99
4.1.1.3	Двопівперіодний випрямляч з виведенням середньої точки вторинної обмотки трансформатора ..	102
4.1.2	Згладжувальний фільтр	104
4.1.2.1	Ємнісні фільтри.....	105
4.1.2.2	Г-подібні фільтри.....	107
4.1.2.3	П-подібні фільтри	108
4.2	Підсилювачі на біполярних транзисторах.....	109
4.2.1	Загальні відомості	109
4.2.2	Розрахунок каскаду підсилювача напруги низької частоти з реостатно-ємнісним зв'язком	112
4.3	Приклад розв'язування задачі.....	118
4.4	Запитання для самоперевірки	121
4.5	Контрольні задачі.....	122
	Література.....	131
	Глосарій	133

Додаток А Технічні дані асинхронних електродвигунів	135
Додаток Б Струмові навантаження проводів та кабелів	138
Додаток В Активні опори проводів	140
Додаток Г Дані запобіжників	141
Додаток Д Параметри діодів, операційних підсилювачів та характеристики транзистора КТ312В	142

Вступ

В посібнику наведені методичні рекомендації щодо виконання розрахунково-графічних робіт (РГР) студентами стаціонарної форми навчання і контрольних робіт студентами заочної форми навчання з таких розділів електротехніки, як електричні машини, основи електропривода, основи електрозабезпечення та основи електроніки.

До кожного розділу пропонується розв'язування типових задач.

Навчальний посібник складено відповідно до навчальних планів і програми підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів всіх неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів України.

Загальні методичні вказівки

Приступити до виконання РГР або контрольної роботи потрібно після вивчення необхідного матеріалу і засвоєння методик розв'язування даного типу задач.

При цьому:

- 1) РГР виконується на стандартних листах формату А4, а контрольна робота в зошиті (також можливе виконання на листах формату А4);
- 2) оформляти роботу потрібно відповідно до вимог ЕСКД (можливе оформлення відповідно до [1]);
- 3) фізичні величини подавати в одиницях вимірювання, що відповідають системі СІ;
- 4) графічні позначення елементів електричних схем виконують відповідно до ГОСТ 728-74, ГОСТ 2.730-73, ГОСТ 2.756-76, ГОСТ 2.755-87, ГОСТ 2.721-74, ГОСТ 2.722-68, ГОСТ 2.723-68, а позначення елементів електричних схем – відповідно до ГОСТ 2.710-81 [2];
- 5) одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ:
 - електрорушійна сила (ЕРС) E , В (вольт);
 - напруга U , В;
 - струм I , А (ампер);
 - потужність активна P , Вт (ват);
 - потужність реактивна Q , вар (вольт-ампер реактивний);
 - потужність повна S , В·А (вольт-ампер);
 - опір електричний активний R , Ом (Ом);
 - опір електричний реактивний X , Ом;
 - опір електричний повний Z , Ом;
 - провідність електрична активна G , См (сименс);
 - провідність електрична реактивна B , См;
 - провідність електрична повна Y , См;
 - індуктивність L , Гн (генрі);
 - електрична ємність C , Ф (фарад);
 - магнітна індукція B , Тл (тесла);
 - напруженість магнітного поля H , А/м (ампер на метр);
 - магнітний потік Φ , Вб (вебер);

- потокозчеплення ψ , Вб;
 - абсолютна магнітна проникність μ , Гн/м (генрі на метр);
 - частота f , Гц (герц);
 - частота кутова ω , рад/с (радіан на секунду);
- 6) комплексні величини позначають рискою знизу $\underline{U}$, $\underline{I}$, $\underline{Z}$, $\underline{Y}$ і т. д.;
- 7) графіки і векторні діаграми виконують у відповідному масштабі. Осі координат виконують суцільними лініями зі стрілками на закінченні, масштаби шкал по осях вибирають рівномірними з використанням всієї площі графіка. Всі шкали повинні мати буквені позначення і одиницю вимірювання. Векторні діаграми будують в масштабі, наприклад:

$$\overline{m}_I = \dots \text{В/мм}; \quad \overline{m}_U = \dots \text{А/мм і т. д.};$$

- 8) якщо контрольна робота або РГР повернена на доопрацювання і виправлення, правки необхідно виконати в кінці роботи в розділі "Робота над помилками". Вносити виправлення по тексту або в розрахунках, що перевірені рецензентом, не можна;
- 9) в кінці контрольної роботи стоять дату її виконання і підпис. Аналогічно при доопрацюванні ставлять дату виконання виправлень.

1 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

1.1 Трансформатори

1.1.1 Загальні відомості

Трансформатором (transformer) називається статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення шляхом електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в другу (вторинну) систему змінного струму [3]. В загальному випадку вторинна систем відрізняється від первинної будь-яким із параметрів: напругою, струмом, числом фаз, формою кривої напруги чи струму.

Трансформатор відіграє одну з головних ролей в передаванні електричної енергії на великі відстані, оскільки в цьому випадку до надходження до кінцевого споживача вона піддається багатократному перетворенню з низької напруги в високу і навпаки.

Крім цього він є незамінним елементом в різних галузях – від електроніки до електромеханіки, електрозварювання.

Діючі значення ЕРС, що наводяться в первинній і вторинній обмотках, визначають за формулами

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f w_1 \Phi_m, \\ E_2 &= 4,44 f w_2 \Phi_m, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де E_1, E_2 – ЕРС первинної та вторинної обмоток відповідно, В;

f – частота змінного струму, Гц;

Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку, Вб;

w_1, w_2 – число витків первинної та вторинної обмоток, відповідно.

Відношення ЕРС обмоток, що дорівнює відношенню чисел витків обмоток, називають **коефіцієнтом трансформації** (transformation factor):

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.2)$$

Рівняння струмів має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2, \\ \dot{I}'_2 = -\frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k}, \end{cases} \quad (1.3)$$

де $\dot{I}_0$ – струм холостого ходу трансформатора, А;

$\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ – струми первинної та вторинної обмоток, відповідно, А;

$\dot{I}'_2$ – приведений струм вторинної обмотки до первинної, А.

Нехтуючи струмом холостого ходу, можна вважати, що

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.4)$$

Струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні числам витків цих обмоток.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) (efficiency) трансформатора при номінальному навантаженні визначається відношенням активних потужностей на виході та вході трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_k + P_0} = \frac{P_2}{P_2 + P_{e1} + P_{e2} + P_0} = 1 - \frac{P_{e1} + P_{e2} + P_0}{P_2 + P_{e1} + P_{e2} + P_0}, \quad (1.5)$$

де P_2 – активна потужність, що споживається навантаженням трансформатора, Вт;

P_1 – активна потужність, що споживається первинною обмоткою з мережі, Вт;

P_k , P_0 – втрати потужності при короткому замиканні та на холостому ході, відповідно, Вт;

P_{e1} , P_{e2} – електричні втрати в первинній та вторинній обмотках, відповідно, Вт.

ККД трансформатора при будь-якому навантаженні визначають за формулою:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \quad (1.6)$$

де β – *коефіцієнт навантаження* (loading factor), що визначається як відношення струму вторинної обмотки до номінального струму вторинної обмотки:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}, \quad (1.7)$$

де $I_{2ном}$ – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора, А:

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{U_{2ном}}, \quad (1.8)$$

де $S_{ном}$ – *повна потужність*, що споживається трансформатором при номінальному навантаженні, В·А:

$$S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}, \quad (1.9)$$

де $I_{1ном}$ – номінальний струм первинної обмотки трансформатора, А;
 $\cos \varphi_2$ – *коефіцієнт потужності* (power factor) вторинної обмотки.

Максимальний ККД відповідає такому значенню коефіцієнта навантаження [3]:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{P_k}{P_0}}. \quad (1.10)$$

Процентна зміна напруги на вторинній обмотці, %:

$$\Delta U_{2\%} = \beta (U_{ка\%} \cos \varphi_2 \pm U_{кр\%} \sin \varphi_2), \quad (1.11)$$

де $U_{ка\%}$ – активна складова напруги короткого замикання, %:

$$U_{ка\%} = \frac{R_k I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%, \quad (1.12)$$

де R_k – активний опір короткого замикання трансформатора, Ом;

$U_{ра\%}$ – реактивна складова напруги короткого замикання, %:

$$U_{кр \%} = \frac{XI_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%. \quad (1.13)$$

Знак "+" відповідає індуктивному, а знак "-" – ємнісному навантаженні.
Втрати потужності холостого ходу, Вт [4]:

$$P_0 = I_0 U_1 \cos \varphi_0, \quad (1.14)$$

де U_1 – напруга первинної обмотки, В;

I_0 – струм холостого ходу, А;

$\cos \varphi_0$ – коефіцієнт потужності холостого ходу.

Повний опір на холостому ході, Ом:

$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_0}. \quad (1.15)$$

Активний опір на холостому ході, Ом:

$$R_0 = Z_0 \cos \varphi_0. \quad (1.16)$$

Реактивний опір на холостому ході, Ом:

$$X_0 = Z_0 \sin \varphi_0. \quad (1.17)$$

Втрати потужності короткого замикання, Вт:

$$P_k = I_{1ном} U_k \cos \varphi_k = I_{1ном}^2 R_k. \quad (1.18)$$

Потужність, що споживається трансформатором при короткому замиканні і витрачається на нагрівання обмоток, Вт:

$$P_k = P_{e1} + P_{e2}. \quad (1.19)$$

Напругу первинної обмотки, при якій струми в обмотках рівні номінальним, називають **номінальною напругою короткого замикання** (voltage of short circuit). Цю напругу відносять до номінальної напруги первинної обмотки, %:

$$U_{к \%} = \frac{U_{кном}}{U_{1ном}} 100\%. \quad (1.20)$$

Повний опір при короткому замиканні, Ом [5]:

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{1ном}}{I_{1ном}}. \quad (1.21)$$

Активний опір при короткому замиканні, Ом:

$$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1ном}^2} \quad (1.22)$$

або

$$R_{\kappa} = Z_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa}, \quad (1.23)$$

де $\cos \varphi_{\kappa}$ – коефіцієнт потужності короткого замикання.

Реактивний опір при короткому замиканні, Ом [6]:

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \quad (1.24)$$

1.1.1.1 Трифазні трансформатори

Співвідношення між лінійними та фазними значеннями струмів і напруг [7 – 9]:

а) при з'єднанні в зірку

$$\begin{aligned} U_{\text{л}} &= \sqrt{3}U_{\text{ф}} = 1,73U_{\text{ф}}, \\ I_{\text{л}} &= I_{\text{ф}}, \end{aligned} \quad (1.25)$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга, В;

$U_{\text{ф}}$ – фазна напруга, В;

$I_{\text{л}}$ – лінійний струм, А;

$I_{\text{ф}}$ – фазний струм, А;

б) при з'єднанні в трикутник

$$\begin{aligned} U_{\text{л}} &= U_{\text{ф}}, \\ I_{\text{л}} &= \sqrt{3}I_{\text{ф}} = 1,73I_{\text{ф}}. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Потужність незалежно від схеми з'єднання визначають за формулами:

а) активна, Вт

$$P = 3P_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi; \quad (1.27)$$

б) реактивна, вар

$$Q = 3Q_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin \varphi; \quad (1.28)$$

в) повна, В·А

$$S = 3S_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}. \quad (1.29)$$

Втрати електричні, Вт:

$$P_{\epsilon} = 3I_{\kappa}^2 R_{\kappa}, \quad (1.30)$$

де I_{κ} – струм короткого замикання, А:

$$I_{\kappa} = I_{1ном}. \quad (1.31)$$

Втрати магнітні, Вт:

$$P_{\text{м}} = P_0 = 3P_{\phi 0} \quad (1.32)$$

або

$$P_0 = \sqrt{3}U_{1ном}I_0 \cos \varphi_0. \quad (1.33)$$

Коефіцієнт трансформації (експлуатаційний) залежить від схеми з'єднання обмоток:

$$k_{\text{експл}} = k \quad \text{при з'єднанні } Y/Y;$$

$$k_{\text{експл}} = k \quad \text{при з'єднанні } \Delta/\Delta;$$

$$k_{\text{експл}} = \sqrt{3}k \quad \text{при з'єднанні } Y/\Delta;$$

$$k_{\text{експл}} = \frac{\sqrt{3}}{k} \quad \text{при з'єднанні } \Delta/Y.$$

Повний опір, Ом:

$$Z = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}I_{\text{л}}} = \frac{U_{\phi}}{3I_{\phi}}. \quad (1.34)$$

Активний опір, Ом:

$$R = \frac{P_0}{3I_{0\phi}^2}, \quad (1.35)$$

де $I_{0\phi}$ – фазний струм холостого ходу, А.

Коефіцієнт потужності холостого ходу:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{\phi} I_{0\phi}} = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1ном} I_{0л}}, \quad (1.36)$$

де $I_{0л}$ – лінійний струм холостого ходу, А.

ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3P_{2\phi}}{3P_{1\phi}} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P}, \quad (1.37)$$

де ΣP – сумарні втрати трансформатора.

1.1.1.2 Автотрансформатори

Прохідна потужність, В·А:

$$S_{np} = S_e + S_m = U_2 I_1 + U_2 I_{ax}, \quad (1.38)$$

де S_e – потужність, що передається електричним шляхом, В·А:

$$S_e = U_2 I_1; \quad (1.39)$$

S_m – потужність, що передається магнітним шляхом, В·А:

$$S_m = U_2 I_{ax}, \quad (1.40)$$

де U_2 – напруга на вторинній обмотці, В;

I_1 – струм первинної обмотки, А;

I_{ax} – струм на спільній ділянці обмоток автотрансформатора, А.

Розрахункова або електромагнітна потужність, В·А:

$$S_p = S_m = S_{np} \left(1 - \frac{1}{k} \right) = S_{np} K_{\epsilon}, \quad (1.41)$$

де K_{ϵ} – коефіцієнт вигідності автотрансформатора:

$$K_{\epsilon} = 1 - \frac{1}{k}. \quad (1.42)$$

1.1.1.3 Вимірювальні трансформатори

Дійсний коефіцієнт трансформації вимірювальних трансформаторів визначають за формулами [3]:

➤ для трансформатора струму

$$k_I = \frac{I_1}{I_2}; \quad (1.43)$$

➤ для трансформатора напруги

$$k_U = \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.44)$$

Номінальні коефіцієнти трансформації:

➤ за струмом

$$k_{I_{\text{ном}}} = \frac{I_{I_{\text{ном}}}}{I_{2_{\text{ном}}}}; \quad (1.45)$$

➤ за напругою

$$k_{U_{\text{ном}}} = \frac{U_{1_{\text{ном}}}}{U_{2_{\text{ном}}}}. \quad (1.46)$$

Навантаження між паралельно включеними трансформаторами розподіляється обернено пропорційно їх напругам короткого замикання (U_{1k} , U_{2k}):

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{U_{IIk}}{U_{Ik}} \frac{S_{I_{\text{ном}}}}{S_{II_{\text{ном}}}}, \quad (1.47)$$

де S_I , S_{II} – фактичне навантаження трансформаторів, кВА;

$S_{I_{\text{ном}}}$, $S_{II_{\text{ном}}}$ – номінальна потужність трансформаторів, кВА.

1.1.2 Приклади розв'язування задач



№ 1.1

Трифазний трансформатор типу ТМ-63/6, з'єднаний за схемою Y/Y-0, має такі паспортні дані: потужність $S_{ном} = 630$ кВА, напруга первинної обмотки $U_{1ном} = 6000$ В, напруга вторинної обмотки $U_{2ном} = 400$ В, втрати потужності холостого ходу $P_x = 1680$ Вт, втрати потужності короткого замикання $P_k = 7600$ Вт, напруга короткого замикання $U_k = 5\%$.

Визначити: номінальні струми первинної та вторинної обмоток трансформатора, коефіцієнт завантаження, якщо активна потужність, підключена до трансформатора $P_2 = 410$ кВт, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2 = 0,75$, струми первинної і вторинної обмоток при розрахункових коефіцієнті навантаження β і ККД η .

Визначити значення максимального ККД, процентну зміну напруги на вторинній обмотці при номінальному струмі і $\cos\varphi_2$, абсолютне значення напруги U_2 .

Розв'язування

1. Номінальні струми в обмотках трансформатора:

➤ у первинній обмотці

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 60,6 \text{ (А)};$$

➤ у вторинній обмотці

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{2ном}} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909,3 \text{ (А)}.$$

2. Коефіцієнт завантаження:

$$\beta = \frac{P_2}{S_{ном} \cos\varphi_2} = \frac{410 \cdot 10^3}{630 \cdot 10^3 \cdot 0,75} = 0,87.$$

3. Струм в обмотках трансформатора при визначеному коефіцієнті завантаження:

$$I_{1\beta} = \frac{\beta S_{ном}}{\sqrt{3} U_{1ном}} = \frac{0,87 \cdot 630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 52,6 \text{ (A)};$$

$$I_{2\beta} = \frac{\beta S_{ном}}{\sqrt{3} U_{2ном}} = \frac{0,87 \cdot 630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 789 \text{ (A)}.$$

4. ККД трансформатора при $\beta = 0,87$:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} =$$

$$= \frac{0,87 \cdot 630 \cdot 0,75 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 630 \cdot 10^3 \cdot 0,75 + 1680 + 0,87^2 \cdot 7600} = 0,98.$$

5. Максимальний коефіцієнт завантаження:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} = \sqrt{\frac{1680}{7600}} = 0,47.$$

6. Максимальний ККД:

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta_{max} S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta_{max}^2 P_k} =$$

$$= \frac{0,47 \cdot 630 \cdot 0,75 \cdot 10^3}{0,47 \cdot 630 \cdot 10^3 \cdot 0,75 + 1680 + 0,47^2 \cdot 7600} = 0,985.$$

7. Активна складова напруги короткого замикання:

$$U_{ка} = \frac{P_k}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{7600}{630000} \cdot 100\% = 1,21\%.$$

8. Реактивна складова напруги короткого замикання:

$$U_{кр} = \sqrt{U_k^2 - U_{ка}^2} = \sqrt{5^2 - 1,2^2} = 4,85\%.$$

9. Процентна зміна напруги на вторинній обмотці трансформатора при активно-індуктивному навантаженні:

$$U_2 \% = \beta \left(U_{ka} \% \cos \varphi_2 + U_{kp} \% \sin \varphi_2 \right) =$$

$$= 0,87 \cdot (1,21 \cdot 0,75 + 4,85 \cdot 0,66) = 3,57\%.$$

10. Спад напруги 3,75% відповідає абсолютному значенню

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2ном}}{100} = \frac{3,57 \cdot 400}{100} = 14,28 \text{ (В)}.$$

11. Напруга на вторинній обмотці при номінальному активно-індуктивному навантаженні:

$$U_2 = U_{2ном} - \Delta U = 400 - 14,28 = 385,72 \text{ (В)}.$$



№ 1.2

Трифазний трансформатор має такі паспортні дані: номінальна потужність $S_{ном} = 63 \text{ кВА}$, напруга первинної обмотки $U_{1ном} = 10 \text{ кВ}$, напруга вторинної обмотки $U_{2ном} = 0,4 \text{ кВ}$, обмотки з'єднанні за схемою Y/Y . Активний поперечний переріз $S_{пер} = 0,0142 \text{ м}^2$, амплітудне значення магнітної індукції $B_{max} = 1,35 \text{ Тл}$, частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$.

Визначити: номінальні струми первинної та вторинної обмоток трансформатора, число витків фази первинної та вторинної обмоток.

Розв'язування

1. Номінальні струми первинної та вторинної обмоток:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 3,64 \text{ (А)};$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{2ном}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 90,9 \text{ (А)}.$$

2. ЕРС, що наводиться в первинній і вторинній обмотках трансформатора (в первинній обмотці спадом напруги в режимі холостого ходу нехтуємо):

$$E_1 = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5774 \text{ (В)};$$

$$E_2 = \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ (В)}.$$

3. Число витків первинної обмотки, виходячи із рівняння трансформованої ЕРС:

$$w_1 = \frac{E_1}{4,44 f B_m S_{пер}} = \frac{5774}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,35 \cdot 0,0142} = 1338 \text{ (витків)}.$$

4. Число витків вторинної обмотки:

$$w_2 = w_1 \frac{E_2}{E_1} = 1357 \cdot \frac{231}{5774} = 54 \text{ (витків)}.$$

1.1.3 Запитання для самоперевірки



1. Загальні відомості про трансформатора. Класифікація трансформаторів.
2. Будова трансформатора. Призначення основних і допоміжних елементів трансформатора.
3. Вивести вираз для діючих значень ЕРС, що наводяться в первинній і вторинній обмотках трансформатора основним магнітним потоком.
4. В чому полягає суть режиму холостого ходу трансформатора? Накреслити векторну діаграму режиму холостого ходу.
5. Чому на сердечнику трансформатора обмотку вищої та нижчої напруги розміщують на загальному сердечнику?
6. Записати рівняння намагнічувальних сил і рівняння струмів трансформатора. Пояснити фізичний зміст складових первинного струму.
7. В чому полягає суть явища розсіювання в трансформаторі?

- Записати вираз E_{PC} , що наводиться потоком розсіювання в обмотках трансформатора.
8. Записати рівняння напруг (рівняння електричного стану) для первинної та вторинної обмоток і пояснити зміст кожного з членів цього рівняння.
 9. Що називається приведеним значенням величин вторинної обмотки?
 10. Накреслити Т, Г і спрощену схему заміщення трансформаторів. Записати рівняння для визначення параметрів схем заміщення.
 11. Накреслити векторну діаграму для випадку активно-індуктивного навантаження, і пояснити принцип її побудови.
 12. Накреслити схему для проведення дослідів холостого ходу трансформатора. Які параметри визначаються із цього дослідів?
 13. Накреслити векторну діаграму режиму холостого ходу трансформатора.
 14. Чому в досліді холостого ходу потужність втрат в міді настільки мала, що нею можна знехтувати?
 15. Накреслити схему для проведення дослідів короткого замикання трансформатора. Які параметри визначаються з цього дослідів?
 16. Чому в досліді короткого замикання потужність втрат в сталі настільки мала, що нею нехтують?
 17. Сформулювати означення для напруг короткого замикання; назвати наближене її значення.
 18. Вивести вираз для процентної зміни напруги трансформатора.
 19. Записати вирази для визначення номінального ККД і ККД з урахуванням відносної величини вторинного струму.
 20. Зобразити трифазний трансформатор з різними схемами з'єднання і визначити номер групи.
 21. Накреслити принципові схеми включення електровимірювальних приладів через вимірювальні трансформатори в одно- і трифазних колах.

1.1.4 Контрольні задачі



Для трифазного трансформатора, параметри якого

- Задача 1.1
(варіанти 0-25)
- задані в табл. 1.1, необхідно:
- зобразити схему електричну принципову трансформатора з навантаженням;
 - визначити номінальні фазні напруги, а також фазні й лінійні струми в обмотках;
 - визначити коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos\varphi_0$;
 - визначити параметри схеми заміщення трансформатора ($R_0, X_0, R_1, X_1, R_2, X_2$);
 - накреслити Т-подібну схему заміщення трансформатора з параметрами елементів;
 - побудувати векторну діаграму трансформатора для навантаження $\beta = 0,8$ та $\cos\varphi_2 = 0,75$;
 - побудувати зовнішню характеристику $U_2 = f_1(\beta)$ та залежність ККД від навантаження $\eta = f_2(\beta)$ для $\cos\varphi_2 = 0,75$.
- Дані для розрахунку подані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до задачі 1.1

Вар.	Група з'єднань	Дані для розрахунку						
		$S_{ном},$ кВА	$U_{1ном},$ В	$U_{20},$ В	$U_k,$ %	$P_k,$ Вт	$P_x,$ Вт	$I_0,$ %
0	Y/Y ₀ -0	10	6300	400	5,0	3335	105	10,0
1	Y/Δ-11	20	6300	230	5,0	600	180	9,0
2	Y/Y ₀ -0	30	10000	400	5,0	850	300	9,0
3	Y/Y ₀ -0	50	10000	400	5,0	1325	440	8,0
4	Y/Y ₀ -0	75	10000	230	5,0	1875	590	7,5
5	Y/Y ₀ -0	100	10000	525	5,0	2400	730	7,5
6	Y/Δ-11	180	10000	525	5,0	4100	1200	7,0
7	Y/Y ₀ -0	240	10000	525	5,0	5100	1600	7,0
8	Y/Δ-11	320	35000	10500	6,5	6200	2300	7,5
9	Y/Y ₀ -0	420	10000	525	5,5	7000	2100	6,6

Продовження табл. 1.1

Вар.	Група з'єднань	Дані для розрахунку						
		$S_{ном},$ кВА	$U_{1ном},$ В	$U_{20},$ В	$U_k,$ %	$P_k,$ Вт	$P_x,$ Вт	$I_0,$ %
10	Y/Y ₀ -0	25	6000	230	4,5	600	125	3,0
11	Y/Y ₀ -0	25	10000	230	4,7	690	125	3,0
12	Y/Δ-11	25	6000	400	4,5	600	125	3,0
13	Y/Δ-11	25	10000	400	4,7	690	125	3,0
14	Y/Y ₀ -0	40	10000	20	4,5	880	180	3,0
15	Y/Y ₀ -0	40	6000	20	4,5	880	180	3,0
16	Y/Y ₀ -0	40	6000	400	4,7	1000	180	3,0
17	Y/Δ-11	40	10000	400	4,0	690	125	3,0
18	Y/Δ-11	63	6000	230	4,5	1280	260	3,2
19	Y/Δ-11	63	6000	400	4,5	1280	260	2,8
20	Y/Δ-11	63	100000	230	4,7	1470	260	2,8
21	Y/Y ₀ -0	63	10000	400	4,7	1470	260	2,8
22	Y/Y ₀ -0	63	2000	400	4,7	1470	260	2,8
23	Y/Y ₀ -0	63	20000	230	4,7	1470	260	2,8
24	Y/Y ₀ -0	63	2000	400	4,5	1280	260	2,8
25	Y/Δ-11	100	10000	230	4,7	2270	365	2,6



Задача 1.2 (варіанти 1-10)

Трифазний трансформатор має такі номінальні дані (табл. 1.2): потужність $S_{ном}$, напругу обмоток $U_{1ном}$, $U_{2ном}$, а струми в обмотках $I_{1ном}$, $I_{2ном}$; при коефіцієнті завантаження β трансформатор віддає в навантаження активну потужність P_2 , при цьому коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi_2$. Втрати в сталі трансформатора P_0 , а в міді – P_k . При коефіцієнті завантаження β ККД трансформатора $\eta_{ном}$. Коефіцієнт трансформації k . Визначити величини, позначені знаком запитання в табл. 1.2, та відповісти на запитання 15 і 19 п.1.1.3.

Примітка. При заповненні рядка з $S_{ном}$ необхідно використати шкалу номінальних потужностей трансформаторів (25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000 кВ·А).

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до задачі 1.2

Парам.	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}$, кВА	?	?	?	63	160	?	1000	?	1600	630
$U_{1ном}$, кВ	?	10	?	?	?	10	?	?	?	6
$U_{2ном}$, кВ	0,4	?	0,65	0,4	0,65	0,69	?	0,4	?	?
$I_{1ном}$, А	2,41	?	?	6,05	?	?	91,4	?	?	?
$I_{2ном}$, А	36	231	334	?	?	?	1445	?	925	?
P_2 , кВт	?	?	250	47,3	100	59,5	500	?	1000	?
$\cos\varphi_2$	0,8	1,0	0,7	?	?	0,85	0,65	0,8	0,75	0,9
P_0 , Вт	140	600	1100	300	?	350	3000	800	?	1900
P_k , Вт	650	3000	?	1400	3000	2200	?	4000	165000	8500
β	0,8	0,7	?	1,0	0,85	0,7	?	0,75	?	0,8
$\eta_{ном}$	?	?	0,97	?	0,95	?	0,98	0,936	0,98	?
k	?	25	9,23	?	11,5	?	?	15	3,5	15



Задача 1.3
(варіанти 11-20)

Трифазний трансформатор має такі номінальні дані (табл. 1.3): потужність $S_{ном}$, напругу обмоток $U_{1ном}$, $U_{2ном}$, струми в обмотках $I_{1ном}$, $I_{2ном}$, коефіцієнт трансформації k . ЕРС, що наводиться в обмотках, – E_1 та E_2 . Кількість витків обмоток w_1 , w_2 . Максимальне значення магнітної індукції в сердечнику B_{max} , площа перерізу сердечника $S_{пер}$. Частота струму в мережі f . З'єднання обмоток трансформатора "зірка-трикутник". Спадом напруги в первинній обмотці трансформатора на холостому ході знехтувати.

Визначити невідомі величини, відзначені знаком запитання в табл. 1.3, та відповісти на запитання: чому в досліді короткого замикання трансформатора можна знехтувати втратами в сталі, а в досліді холостого ходу – втратами в міді обмоток?

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до задачі 1.3

Парам.	Варіант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$S_{ном}$, кВА	400	?	9	10	100	?	?	1000	630	?
$U_{1ном}$, кВ	6	10	?	?	1	?	6	?	?	?
$U_{2ном}$, кВ	?	?	?	?	0,23	0,4	?	?	?	0,4
$I_{1ном}$, А	?	6,07	?	?	?	3,86	2,41	?	?	?
$I_{2ном}$, А	?	152	209	?	?	?	?	?	528	908
k	15	?	8,7	?	?	?	15	25	?	15
E_1 , В	?	?	?	127	?	3470	?	?	5780	7
E_2 , В	?	400	20,8	?	?	?	?	231	?	?
w_1 , витк.	?	5000	?	139	?	?	1600	?	226	4500
w_2 , витк.	?	?	69,5	?	?	65	?	?	?	?
B_{max} , Тл	1,2	?	1,30	?	1,4	1,6	1,15	1,25	?	1,5
$S_{пер}$, см ²	150	50	?	25	120	25	?	500	320	?
f , Гц	100	50	100	50	50	?	50	400	100	50



Задача 1.4 (варіанти 21-30)

Трифазний трансформатор має такі номінальні дані (табл. 1.4): потужність $S_{ном}$, напругу обмоток $U_{1ном}$, $U_{2ном}$, струми в обмотках $I_{1ном}$, $I_{2ном}$. До трансформатора приєднанні n однакових асинхронних двигунів. Номінальна (корисна) потужність двигуна $P_{ном}$, напруга $U_{ном}$, ККД $\eta_{ном}$ та коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном}$. Номінальний струм двигуна $I_{ном}$. При цьому дійсний струм вторинної обмотки I_2 . Коефіцієнт завантаження трансформатора β .

Визначити невідомі величини та відповісти на запитання.

- Як визначають ЕРС, що наводиться в первинній та вторинній обмотках трансформатора?
- Як потрібно змінити кількість витків обмоток, якщо частоту струму збільшити в 4 рази при збереженні одних і тих значень ЕРС обмоток?

Примітка. При заповненні стовпця 2 табл. 1.4 потрібно використовувати шкалу стандартних

потужностей трансформаторів: 25, 40, 63, 100, 250, 160, 400, 630, 1000 кВА.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до задачі 1.4

Парам.	Варіант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$S_{ном}$, кВА	?	?	100	?	400	160	?	?	630	250
$U_{1ном}$, кВ	6	?	10	?	6	?	?	6	6	1
$U_{2ном}$, кВ	0,23	?	?	0,23	0,4	0,69	0,23	0,4	0,23	0,4
$I_{1ном}$, А	?	2,4	?	3,85	?	15,4	12,15	?	?	?
$I_{2ном}$, А	?	36,2	144,5	?	?	?	?	?	?	?
n , шт.	22	5	?	?	?	20	8	?	30	?
$P_{ном}$, кВт	20	2,4	6,3	5	10	7	4,5	12,8	12,4	?
$U_{ном}$, В	220	380	380	220	380	660	220	380	220	380
$\eta_{ном}$	0,9	?	0,88	0,86	0,89	0,88	0,84	?	0,9	0,87
$\cos\varphi_{ном}$	0,84	0,82	0,84	0,84	0,85	0,85	?	0,84	?	0,82
$I_{ном}$, А	?	5,24	?	?	?	?	16,6	26	?	30,7
I_2 , А	?	?	?	80	?	?	?	520	?	?
β	?	?	?	0,8	?	0,0	?	0,9	0,8	?

Задача 1.5
(варіанти 31-40)

Трифазний трансформатор номінальної потужності $S_{ном}$ із з'єднанням обмоток "зірка-зірка" має номінальний первинний струм $I_{1ном}$ і напругу обмоток $U_{1ном}$ і $U_{2ном}$. Магнітна індукція в сердечнику (амплітуда) B_{max} , площа перерізу сердечника $S_{пер}$. Магнітний потік в сердечнику (амплітуда) Φ_{max} , ЕРС обмоток E_1 та E_2 . Кількість витків обмоток w_1 , w_2 . Коефіцієнт трансформації k , частота струму в мережі f . Струм холостого ходу трансформатора у відсотках від номінального первинного струму I_0 . Коефіцієнт потужності трансформатора на холостому ході $\cos\varphi_0$.

Визначити невідомі величини. Побудувати в масштабі векторну діаграму трансформатора для однієї фази на холостому ході.

При побудові векторної діаграми спадом напруги в

первинній обмотці на холостому ході знехтувати. Дані для розрахунку наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Вихідні дані до задачі 1.5

Парам.	Варіант									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$S_{ном}$, кВА	10	?	1000	?	100	?	250	?	160	63
$I_{1ном}$, А	?	20	?	15	?	14,43	?	46	15,4	12,1
$U_{1ном}$, кВ	?	?	?	3	6	10	?	?	?	?
$U_{2ном}$, кВ	?	?	?	0,23	0,4	?	?	?	0,23	0,23
B_{max} , Тл	?	15	?	1,25	1,4	1,38	?	1,1	1,6	
$S_{пер}$, см ²	25	?	150	?	95	?	160	?	120	60
Φ_{max} , Вб	?	0,029	?	0,00625	?	0,02	0,0208	0,005	?	?
E_1 , В	5780	578	3470	?	?	?	231	379	?	?
E_2 , В	?	?	400	?	?	?	?	?	?	?
w_1 , витк.	?	?	1080	6250	?	?	100	?	?	752
w_2 , витк.	200	180	?	?	?	?	100	?	62	?
k	25	?	?	?	?	25	25	5	?	?
f , Гц	1002	6	50	?	50	50	25	400	?	100
I_0 , %	4	6	2	3,5	5	2,5	2,8	8	2,5	7
$\cos\varphi_0$	0,18	0,22	0,12	0,18	0,15	0,1	0,16	0,25	0,11	0,2



Задача 1.6 (варіанти 41-50)

Трифазний трансформатор характеризується такими даними: номінальною потужністю $S_{ном}$, вищою $U_{1ном}$ та нижчою $U_{2ном}$ лінійними напругами, потужністю втрат холостого ходу P_0 , зміною напруги при номінальному навантаженні та $\cos\varphi_2 = 0,8$, напругою короткого замикання U_k , схемою з'єднання обмоток Y/Y.

Визначити:

- фазні напруги первинної та вторинної обмоток на холостому ході;
- коефіцієнт трансформації;
- номінальні струми в обмотках трансформатора;
- активний та реактивний опори фаз первинної та вторинної обмоток;

д) ККД трансформатора при $\cos\varphi_2 = 0,8$ і $\cos\varphi_2 = 1$ та коефіцієнтах завантаження $\beta = 0,5; 0,8$.

Побудувати векторну діаграму для однієї фази навантаженого трансформатора при активно-індуктивному навантаженні $\cos\varphi_2 < 1$. Дані для розрахунку наведені в табл. 1.6.

Вказівка. Прийняти до уваги, що в досліді короткого замикання потужність втрат порівну розподілена між обмотками.

Таблиця 1.6 – Вихідні дані до задачі 1.6

Парам.	Варіант									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$S_{ном}, \text{кВА}$	5	5	10	10	10	25	25	25	40	40
$U_{1ном}, \text{кВ}$	6	6	6	10	6	6	10	10	6	10
$U_{2ном}, \text{кВ}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$P_{к}, \text{Вт}$	60	100	110	140	160	180	220	200	250	300
$\Delta U, \%$	3,8	4,0	3,5	3,45	3,7	3,2	3,4	3,1	2,9	2,8
$U_{к}, \%$	5	5,5	5	4,5	5,5	5	4,5	5	5,5	4,5

1.2 Асинхронні машини

1.2.1 Загальні відомості

Асинхронні машини (asynchronous machines) – це електричні машини змінного струму, ротор яких обертається не синхронно з обертовим магнітним полем машини.

Асинхронні машини можуть працювати в трьох режимах: двигуна, генератора, електромагнітного гальма. Основним типом асинхронних машин, які використовуються на практиці, є машини, що працюють в режимі двигуна. Тому розглядаємо саме двигунний режим роботи асинхронної машини.

Робота асинхронних двигунів базується на:

- утворенні кругового обертового магнітного поля струмом статора;
- наведенні ЕРС в колі ротора та протіканні в ньому струму;
- взаємодії магнітного поля зі струмом в роторі.

Під обертовим магнітним полем розуміють постійний за величиною магнітний потік, що обертається в просторі з постійною кутовою швидкістю ω_1 , рад/с:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (1.48)$$

де f_1 – частота напруги мережі, Гц;

p – число пар полюсів обмотки статора двигуна.

Виходячи із принципу дії асинхронного двигуна, магнітне поле статора і ротора мають різну частоту обертання, тобто обертаються асинхронно. Відставання ротора від синхронної швидкості обертання магнітного поля характеризується **ковзанням** (sliding) [3]:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (1.49)$$

де n_1 – частота обертання (rotation frequency) магнітного поля, об/хв:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}; \quad (1.50)$$

n_2 – частота обертання ротора, об/хв.;

ω_2 – кутова швидкість обертання ротора, рад/с.

При аналізі й розрахунках роботи асинхронного двигуна розглядають:

а) **номінальне ковзання**:

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1} \quad (1.51)$$

або

$$s_{ном} = \frac{\omega_1 - \omega_{ном}}{\omega_1}, \quad (1.52)$$

де $n_{ном}$ – номінальна швидкість обертання ротора, об/хв;

$\omega_{ном}$ – номінальна кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

б) **критичне ковзання** (critical sliding):

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right), \quad (1.53)$$

де λ – *перевантажувальна здатність* (overloading possibility) *двигуна*:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}}, \quad (1.54)$$

де $M_{\max}$ – максимальний (критичний) момент (maximum moment), Н·м;

$M_{ном}$ – номінальний момент (nominal moment), Н·м.

Швидкість обертання ротора визначається із рівняння, об/хв:

$$n_2 = n_1 (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s). \quad (1.55)$$

Частота струму і ЕРС, наведених магнітним полем статора в обмотці ротора, Гц:

$$f_2 = s f_1. \quad (1.56)$$

Діюче значення ЕРС, наведеної в кожній фазі обмотки статора, В:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot \Phi_{\max}, \quad (1.57)$$

де w_1 – кількість витків обмотки однієї фази статора;

$k_{об1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора;

$\Phi_{\max}$ – амплітудне значення магнітного потоку обертового магнітного поля, Вб.

Діюче значення ЕРС нерухомого ротора, В:

$$E_{2н} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_{об2} \cdot k_c \cdot \Phi_m, \quad (1.58)$$

де w_2 – кількість витків фази обмотки ротора;

$k_{об2}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки ротора;

$k_{об1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора;

k_c – коефіцієнт скошу пазів обмотки ротора.

Відношення ЕРС обмоток статора E_1 до ЕРС обмоток ротора E_2 називається *коефіцієнтом трансформації асинхронного двигуна*:

$$k = \frac{E_1}{E_{2H}} = \frac{w_1 k_{об1}}{w_2 k_{об2} k_c}. \quad (1.59)$$

Нехтуючи різницею обмотувальних коефіцієнтів, величини яких знаходяться в межах 0,96 – 0,90, а коефіцієнт скосу k_c обмотки ротора наближається до одиниці, можна вважати:

$$k \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.60)$$

Активна потужність, що споживається двигуном з мережі, Вт:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot I_{1ном} \cdot \cos \varphi_1, \quad (1.61)$$

де $U_{1\phi}$ – фазне значення напруги мережі, В;

$U_{1ном}$ – лінійне значення напруги мережі, В;

$I_{1\phi}$ – фазне значення струму двигуна, А;

$I_{1ном}$ – лінійне значення струму двигуна, А;

$\cos \varphi_1$ – коефіцієнт потужності (характеризує кут зсуву фаз між напругою і струмом в фазі обмотки статора).

ККД двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.62)$$

де P_2 – корисна потужність на валу двигуна, Вт.

Електромагнітна потужність (electromagnetic power) двигуна:

$$P_{ем} = P_1 - \Delta P_1 = \sqrt{3} U_{1ном} \cdot I_{1ном} \cdot \cos \varphi_1 - (\Delta P_{cm1} + \Delta P_{e1}) = M \omega_1, \quad (1.63)$$

де ΔP_1 – втрати в статорі, Вт;

ΔP_{cm1} – магнітні втрати в сталі (steel magnetic losses) статора, Вт:

$$\Delta P_{cm1} = P_{01} = \sqrt{3} U_{1ном} I_0 \cos \varphi_{10}, \quad (1.64)$$

де I_0 – струм, що споживається двигуном з мережі в режимі холостого ходу, А;

$\cos \varphi_0$ – коефіцієнт потужності двигуна в режимі холостого ходу;

ΔP_{e1} – електричні втрати (electrical losses) в обмотці статора, Вт:

$$\Delta P_{e1} = 3I_1^2 R_1, \quad (1.65)$$

де R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

M – обертовий момент двигуна, Н·м.

Корисна потужність на валу двигуна:

$$P_2 = P_1 - \sum P = P_1 - (\Delta P_{cm1} + \Delta P_{m1} + \Delta P_{cm2} + \Delta P_{e2} + P_{mex} + \Delta P_{доd}), \quad (1.66)$$

де $\sum P$ – сумарні втрати, Вт:

$$\sum P = \Delta P_{cm1} + \Delta P_{m1} + \Delta P_{cm2} + \Delta P_{e2} + P_{mex} + \Delta P_{доd}, \quad (1.67)$$

ΔP_{cm2} – магнітні втрати в сталі ротора, Вт;

ΔP_{e2} – електричні втрати в обмотці роторі, Вт;

P_{mex} – механічні втрати (mechanical losses), Вт;

$P_{доd}$ – додаткові втрати (additional losses), Вт.

Корисну потужність можна визначити і як, Вт

$$P_2 = P_{em} (1 - s) = M \cdot \omega_2, \quad (1.68)$$

$$P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55}. \quad (1.69)$$

Обертовий момент (rotation moment) на валу, Н·м:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_2} \quad (1.70)$$

або

$$M = \frac{3E_{2s} \cdot I_{2s} \cdot \cos \varphi_2}{\omega_1}, \quad (1.71)$$

де E_2 – ЕРС, що наводиться в провідниках обмотки ротора при його обертанні, В;

I_{2s} – струм, що протікає в обмотці ротора при його обертанні, А;

$\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності (характеризує кут зсуву фаз між напругою і струмом в фазі обмотки ротора).

Обертовий момент можна визначити і як

$$M = C_m \cdot I_{2s} \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \varphi_2, \quad (1.72)$$

$$M = C_1 \cdot U_1^2, \quad (1.73)$$

де C_1 – постійний коефіцієнт, який залежить від конструкції машини.

Струм нерухомого ротора:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}, \quad (1.74)$$

де E_2 – ЕРС, що наводиться в провідниках обмотки нерухомого ротора, В;

Z_2 – повний опір обмотки нерухомого ротора, Ом;

R_2 – активний опір обмотки ротора, Ом;

X_2 – реактивний опір обмотки ротора, Ом.

Струм рухомого ротора, А:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}, \quad (1.75)$$

де Z_{2s} – повний опір обмотки рухомого ротора, Ом.

Кратність пускового струму (multiplicity of starting current):

$$k_I = \frac{I_n}{I_{ном}}, \quad (1.76)$$

де I_n – пусковий струм двигуна, А;

$I_{ном}$ – номінальний струм двигуна, що споживається з мережі, А.

Кратність пускового моменту (multiplicity of starting moment):

$$k_M = \frac{M_n}{M_{ном}}, \quad (1.77)$$

де M_n – пусковий момент двигуна, Н·м.

Опір регулювального реостата асинхронного двигуна з фазним ротором, Ом:

$$R_{рег} = R_2 \left(\frac{s}{s_H} - 1 \right). \quad (1.78)$$

Індуктивний опір обертового ротора, Ом:

$$X_{2s} = X_2 \cdot s, \quad (1.79)$$

де X_2 – реактивний опір нерухомого ротора, Ом.

1.2.2 Приклади розв'язування задач

№ 1.3  Номінальна потужність трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $P_{ном} = 7$ кВт, номінальна напруга $U_{ном} = 380$ В, номінальна швидкість обертання ротора $n_{ном} = 1470$ об/хв, номінальний ККД $\eta_{ном} = 0,88$, номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном} = 0,85$. Кратність пускового струму $k_I = 5,5$, перевантажувальна здатність $\lambda = 1,8$.

Розрахувати:

- потужність, що споживається з мережі;
- номінальний та максимальний обертові моменти;
- номінальний і пусковий струми;
- номінальне і критичне ковзання.

Побудувати механічну характеристику двигуна.

Розв'язування

1. Потужність, що споживається з мережі:

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{7000}{0,88} = 7955 \text{ (Вт)}.$$

2. Номінальний обертовий момент:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \frac{7}{1470} = 45,5 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

3. Максимальний обертовий момент:

$$M_{\max} = \lambda M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 45,5 = 81,9 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

4. Номінальний струм:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{7955}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 14,2 \text{ (А)}.$$

5. Пусковий струм:

$$I_n = k_I I_{\text{ном}} = 5,5 \cdot 14,2 = 78,2 \text{ (А)}.$$

6. Для визначення номінального ковзання визначається синхронна швидкість обертання та кількість пар полюсів:

$$p = \frac{60 f}{n_{\text{ном}}} = \frac{60 \cdot 50}{1470} = 2;$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ (об/хв)};$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02.$$

7. Критичне ковзання:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,02 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,066.$$

8. Механічна характеристика $M = f(s)$ будується із рівняння Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}.$$

Задавшись рядом ковзання $0,01 \div 1,0$ розраховується обертовий момент і будується графік (рис. 1.1).

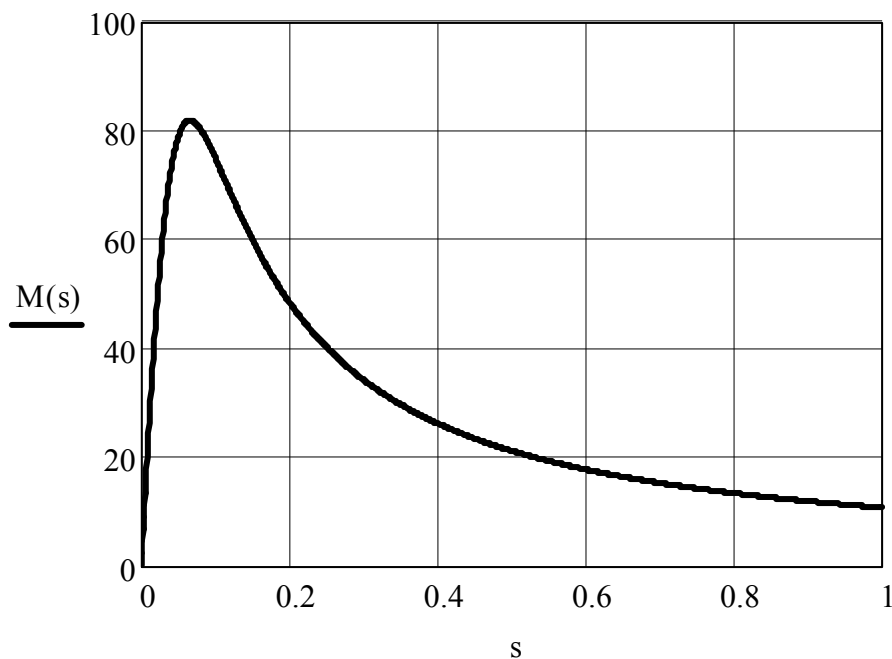


Рисунок 1.1 – Механічна характеристика асинхронного двигуна



№ 1.4

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має такі дані: $\Phi_{\max} = 0,05$ Вб; $w_1 = 100$ витків; $w_2 = 32$ витки; $k_{об1} = 0,955$; $k_{об2} = 0,97$; $f = 50$ Гц; $E_{2s} = 7$ В; $p = 2$; $s_{ном} = 3,5\%$.

Визначити:

- ЕРС E_1 і E_2 ;
- частоту струму ротора f_2 ;
- кутову швидкість магнітного поля статора ω_1 ;
- номінальну кутову швидкість ротора ω_2 .

Розв'язування

1. ЕРС обмотки статора:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_{\max} \cdot k_{об1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,05 \cdot 0,955 = 1060 \text{ (В)}.$$

2. ЕРС обмотки ротора:

$$E_{2н} = \frac{E_{2s}}{s_{ном}} = \frac{7}{0,035} = 200 \text{ (В)}.$$

3. Кутова швидкість обертання магнітного поля статора:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ (ррад/с)}$$

4. Номінальна кутова швидкість обертання ротора:

$$\omega_{ном} = \omega_1 (1 - s_{ном}) = 157 \cdot (1 - 0,035) = 151,6 \text{ (рад/с)}.$$

5. Частота струму ротора:

$$f_2 = f_1 \cdot s_{ном} = 50 \cdot 0,035 = 1,75 \text{ (Гц)}.$$

1.2.3 Запитання для самоперевірки



1. Зобразить на рисунку схематично будову асинхронної машини.
2. Пояснити процес збудження обертового магнітного поля трифазною системою змінного струму.
3. Пояснити принцип роботи асинхронного двигуна.
4. Що називається ковзанням? Як воно визначається і в яких межах змінюється в асинхронних машинах?
5. Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля? Як змінити напрям обертання ротора двигуна?
6. При яких умовах асинхронна машина працює в режимі генератора, електромагнітного гальма? Показати механічні характеристики для цих режимів.
7. Записати рівняння сил намагнічування і струмів двигуна.
8. Записати рівняння струму в роторі, що обертається.
9. Пояснити, в чому полягає аналогія між асинхронним двигуном і трансформатором?
10. Вивести рівняння для обертового моменту двигуна. Зобразити механічну характеристику $M = f(s)$.
11. Чому при збільшенні ковзання в межах від 0 до $s_{кр}$ обертовий момент збільшується, а при подальшому збільшенні ковзання від $s_{кр}$ до 1 – зменшується?
12. Яка частина механічної характеристики $M = f(s)$ відповідає

- стійкій роботі двигуна, а яка – нестійкій?
13. Яким чином впливає величина опору кола ротора на пускові властивості двигуна?
 14. Які існують шляхи зменшення пускового струму асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?
 15. Основні способи пуску асинхронних двигунів. Привести схеми електричні принципи.
 16. Способи регулювання швидкості асинхронних двигунів. Привести схеми електричні принципи.
 17. Яким чином асинхронна машина може бути використана для регулювання напруги?
 18. Який основний недолік однофазного асинхронного двигуна? Які існують способи усунення цього недоліку?

1.2.4 Контрольні задачі



Задача 1.7
(варіанти 0-25)

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором, опір фаз обмоток якого R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , з'єднані в трикутник і працюють при напрузі $U_{ном}$ з частотою $f = 50$ Гц. Число витків на фазу обмоток w_1 , w_2 , число пар полюсів p , обмотувальні коефіцієнти обмоток $k_{об1}$ і $k_{об2}$. Номінальне ковзання $s_{ном}$.

Визначити:

- пускові струми статора і ротора;
- пусковий момент;
- коефіцієнт потужності при пуску двигуна з замкнутим накоротко ротором;
- значення опору пускового реостату, що забезпечує максимальний пусковий момент;
- величину максимального пускового моменту.

При розрахунку струмом холостого ходу знехтувати. Побудувати механічну характеристику двигуна, задавшись ковзанням s від 0,001 до 1. Дані для розрахунку наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Вихідні дані до задачі 1.7

вар.	Дані для розрахунку										
	$U_{ном},$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_1,$ Ом	$X_2,$ Ом	$w_1,$ ВИТК.	$w_2,$ ВИТК.	p	$k_{об1}$	$k_{об2}$	$S_{ном},$ %
0	220	0,46	0,07	1,52	0,22	190	64	2	0,92	0,98	3,0
1	380	0,58	0,06	2,32	0,35	260	82	2	0,93	0,96	3,5
2	380	0,62	0,04	1,84	0,42	362	72	2	0,95	0,98	3,5
3	220	0,74	0,07	3,52	0,37	216	48	3	0,94	0,99	2,5
4	380	0,78	0,06	4,12	0,62	424	74	3	0,96	0,99	2,5
5	220	0,36	0,045	3,62	0,48	358	62	3	0,97	0,99	4,0
6	220	0,42	0,05	2,82	0,34	184	42	2	0,93	0,95	4,5
7	220	0,64	0,06	3,12	0,65	412	82	2	0,67	0,98	5,0
8	220	0,82	0,07	3,82	0,48	362	65	2	0,93	0,96	5,0
9	380	0,84	0,06	4,24	0,52	254	46	3	0,92	0,95	3,0
10	380	0,78	0,04	3,64	0,48	228	42	3	0,95	0,97	3,0
11	380	0,86	0,05	3,48	0,78	316	54	2	0,94	0,98	2,5
12	380	0,76	0,065	2,24	0,54	272	78	2	0,92	0,96	2,5
13	220	0,48	0,03	3,48	0,62	458	92	2	0,93	0,97	2,5
14	220	0,52	0,055	2,94	0,36	162	43	2	0,95	0,98	3,0
15	220	0,56	0,045	4,42	0,64	288	54	3	0,94	0,97	3,0
16	380	0,62	0,06	3,54	0,46	204	62	3	0,96	0,99	3,0
17	380	0,76	0,045	3,72	0,54	356	72	3	0,97	0,99	5,0
18	380	0,66	0,05	2,92	0,64	384	68	2	0,93	0,96	5,0
19	220	0,58	0,035	2,56	0,48	452	82	2	0,67	0,98	5,0
20	220	0,60	0,055	2,64	0,56	412	68	2	0,93	0,95	2,0
21	220	0,68	0,075	3,48	0,32	282	54	3	0,92	0,95	2,0
22	380	0,42	0,065	1,82	0,45	368	48	3	0,95	0,97	4,0
23	380	0,82	0,07	2,52	0,64	180	45	2	0,94	0,98	4,0
24	220	0,54	0,045	2,38	0,45	254	48	2	0,95	0,98	3,0
25	220	0,42	0,03	3,68	0,32	322	58	2	0,97	0,99	3,0


 Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, номінальна потужність якого $P_{ном}$, включений в мережу на номінальну напругу

Задача 1.8
 (варіанти 26-50)

$U_{ном}$ частотою $f = 50$ Гц. Номінальне ковзання двигуна $s_{ном}$, номінальний ККД $\eta_{ном}$, номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном}$, кількість пар полюсів p , перевантажувальна здатність λ , кратність пускового моменту k_M , кратність пускового струму k_I .

Визначити:

- номінальний $I_{ном}$ та пусковий I_n струми;
- номінальний $M_{ном}$, M_n і максимальний M_{max} моменти;
- повні втрати в двигуні при номінальному навантаженні.

Як зміниться пусковий момент при зниженні напруги на його затискачах на 15%? Чи можливий пуск двигуна при цих умовах з номінальним навантаженням?

Розрахувати та побудувати механічну характеристику двигуна, задавшись зміною ковзання s від 0,001 до 1. Дані для розрахунку подані в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Вихідні дані до задачі 1.8

вар.	Дані для розрахунку								
	$U_{ном},$ В	$P_{ном},$ кВт	$s_{ном},$ %	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	p	λ	k_M	k_I
26	220	0,8	3,0	0,78	0,86	3	2,2	1,9	7,0
27	220	0,1	3,0	0,795	0,87	1	2,2	1,9	7,0
28	220	1,5	4,0	0,805	0,88	4	2,2	1,8	7,0
29	220	2,2	4,5	0,83	0,89	1	2,2	1,8	7,0
30	220	3,0	3,5	0,845	0,89	2	2,2	1,7	7,0
31	220	4,0	2,0	0,855	0,89	4	2,2	1,7	7,0
32	220	5,5	3,0	0,86	0,89	3	2,2	1,7	7,0
33	220	7,5	3,5	0,87	0,89	5	2,2	1,6	7,0
34	220	10	4,0	0,88	0,89	6	2,2	1,5	7,0
35	220	13	3,5	0,88	0,89	2	2,2	1,5	7,0
36	220	17	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,2	7,0

Продовження табл. 1.8

вар.	Дані для розрахунку								
	$U_{ном},$ В	$P_{ном},$ кВт	$S_{ном},$ %	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	p	λ	k_M	k_I
37	220	2,2	3,5	0,88	0,90	4	2,2	1,6	7,0
38	220	3,0	3,0	0,89	0,90	1	2,2	1,4	7,0
39	220	4,0	3,0	0,89	0,91	5	2,2	1,5	7,0
40	220	5,5	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1,5	7,0
41	220	7,5	3,0	0,90	0,92	6	2,2	1,7	7,0
43	380	10	3,0	0,885	0,87	2	2,0	1,8	7,0
44	380	13	3,0	0,885	0,89	3	2,0	1,6	7,0
45	380	17	3,0	0,89	0,89	2	2,0	1,4	7,0
46	380	22	3,0	0,90	0,90	1	2,0	1,5	7,0
47	380	30	3,0	0,91	0,91	2	2,0	1,6	7,0
48	380	40	3,0	0,925	0,92	4	2,0	1,7	7,0
49	380	55	3,0	0,925	0,92	6	2,0	1,8	7,0
50	380	75	3,0	0,925	0,92	2	2,0	1,4	7,0



Задача 1.9 (варіанти 1-10)

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (табл. 1.9) при напрузі $U_{ном}$ споживає з мережі потужність P_1 . Номінальна потужність двигуна $P_{ном}$, ККД $\eta_{ном}$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном}$, номінальний струм статора $I_{ном}$, номінальна кутова швидкість $\omega_{ном}$.

Синхронна кутова швидкість ω_1 , номінальне ковзання $s_{ном}$. Пусковий струм двигуна I_n , кратність пускового струму k_I . Повні втрати потужності ΣP . Номінальний момент двигуна $M_{ном}$, кутова швидкість обертання ротора $\omega_{ном}$.

При зміні корисного навантаження до значення P_2 , ковзання змінилось до значення s_2 , а обертовий момент – до значення M_2 .

Знайти невідомі величини, вказані в табл. 1.9 і відмітити переваги та недоліки запуску асинхронних двигунів з короткозамкненим і фазним роторами.

Таблиця 1.9 – Вихідні дані до задачі 1.9

Парам.	варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_1 , кВт	?	?	18,4	?	?	?	7,5	?	?	10
$P_{ном}$, кВт	20	?	16	?	4,5	?	?	?	100	8,5
$\eta_{ном}$	?	0,9	?	0,83	0,86	0,86	?	0,87	?	?
$\cos\varphi_{ном}$	?	0,84	?	0,83	0,82	?	0,84	0,83	?	0,84
$I_{ном}$	23,7	?	34	28	?	?	13,5	6	200	?
ω_1 , рад/с	78,53	104,71	?	?	104,71	104,71	?	157	?	157
$\omega_{ном}$, рад/с	?	100,52	?	?	?	102,61	75,91	?	74,87	150,78
$s_{ном}$	5	?	5,33	4	3	?	3,33	?	4,67	?
I_n , А	120	255	?	?	?	100	80	?	?	90
ΣP , кВт	3	2,5	?	1,5	?	?	1,5	?	?	?
$M_{ном}$, Н·м	?	?	216	73,1	?	60	?	18,5	?	?
k_I	?	5	7	4,5	6	4	?	5	6	?
P_2 , кВт	15	?	14	8,5	?	8	?	3,8	80	?
s_2 , %	3	5	4,5	5,5	4	3	4	?	?	3
M_2 , Н·м	?	252	?	?	60	?	100	25	1060	40
$U_{ном}$, В	380	?	220	?	?	380	?	?	660	?



Задача 1.10
(варіанти 11-20)

Для трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором (табл. 1.10) задані такі величини: амплітуда магнітного потоку статора Φ_{max} ; число витків обмоток статора і ротора w_1 і w_2 ; обмотувальні коефіцієнти обмоток $k_{об1}$ і $k_{об2}$; ЕРС в обмотках E_1 і E_2 (на фазу); число пар полюсів обмотки статора p ; частота струму в мережі f_1 і в роторі – f_2 ; ЕРС, що наводиться у фазі обертового ротора E_{2s} , при ковзанні s . Синхронна кутова швидкість ω_1 , кутова швидкість обертання ω_2 .

Визначити невідомі величини, вказані в табл. 1.10, і відповісти на запитання: чому в асинхронному двигуні з глибоким пазом або подвійною клітинкою на роторі пусковий струм менший, а пусковий момент більший, ніж у двигунів із звичайним ротором?

Таблиця 1.10 – Вихідні дані до задачі 1.10

Парам.	варіант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\Phi_{\max}$ Вб	0,02	?	0,01	?	0,008	0,05	?	0,06	0,04	?
w_1 , витк.	50	100	60	200	?	100	260	140	50	?
w_2 , витк.	25	70	35	?	?	40	130	?	?	36
$k_{o\phi 1}$	0,94	0,96	0,97	0,95	0,955	?	0,96	0,95	0,97	0,93
$k_{o\phi 2}$	0,96	?	0,95	0,965	0,97	0,96	?	0,94	0,98	0,95
E_1 , В	?	200	?	210	100	1088	?	?	?	110
E_2 , В	?	?	?	115	?	?	65	?	?	55
p	?	?	6	2	4	?	1	?	3	7
f_1 , Гц	50	?	50	100	50	100		50	?	?
f_2 , Гц	?	4	5	?	?	9	?	?	?	1,5
E_{2s} , В	?	?	?	2,3	10	8	?	6	5	?
ω_1 , рад/с	104,71	78,53	?	?	?	104,71	157	104,71	?	?
ω_2 , рад/с	?	75,39	?	?	74,5	?	?	150,78	94,7	101,57
s , %	5	?	?	?	?	?	2,5	4	?	3



Задача 1.11
(варіанти 21-30)

Трифазний двигун з короткозамкненим ротором (табл. 1.11) при номінальному струмі $I_{ном}$ і напрузі $U_{ном}$ споживає з мережі потужність P_1 . Номінальна потужність двигуна $P_{ном}$, ККД $\eta_{ном}$, коефіцієнт потужності $\cos\phi_{ном}$, кутова швидкість обертання магнітного поля статора ω_1 , а ротора – ω_2 . Номінальне ковзання $s_{ном}$. Двигун розвиває номінальний момент $M_{ном}$, максимальний $M_{\max}$ та пусковий M_n , перевантажувальна здатність λ . Кратність пускового моменту k_M .

Визначити невідомі величини, вказані в табл. 1.11, відповісти на запитання : чому при включенні реостата в коло фазного ротора двигуна зменшується його пусковий струм і збільшується пусковий момент?

Таблиця 1.11 – Вихідні дані до задачі 1.11

Парам.	варіант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
P_1 , кВт	10,7	?	?	?	2,84	18,5	?	1,75	1,75	?
$P_{ном}$, кВт	9	5,5	?	?	2,5	?	?	1,5	?	10
$U_{ном}$, В	380	220	660	?	380	660	380	220	?	220
$\eta_{ном}$	?	0,85	0,85	0,87	?	0,88	0,88	?	0,9	0,85
$\cos\varphi_{ном}$	0,84	?	?	0,84	0,85	0,82	?	0,83	0,85	0,82
$I_{ном}$	?	20	5,5	42,2	?	?	10	?	23,6	?
ω_1 , рад/с	?	157	157	?	?	?	104,97	67,53	314,13	104,71
ω_2 , рад/с	99,47	150,78	?	101,57	76,44	?	102,61	?	298,43	?
$S_{ном}$	5	?	4	3	?	5	2	?	?	3
$M_{ном}$, Н·м	?	?	?	200	?	180	?	20,2	?	?
M_{max} , Н·м	230	?	?	?	?	?	?	60	14	?
M_n , Н·м	?	35	210	?	?	290	50	35	46	?
λ	?	1,65	2	2,3	2,5	?	1,8	?	?	2,4
k_M	1,2	1,3	?	?	1,1	1,15	1,1	?	1,8	1,7

1.3 Електричні машини постійного струму

1.3.1 Загальні відомості

Машини постійного струму використовуються як двигуни і генератори. Двигуни постійного струму мають значні переваги над двигунами інших типів:

- допускають плавне регулювання швидкості обертання вала різними способами;
- мають великий пусковий момент.

У генераторах постійного струму є можливість плавно регулювати ЕРС в широких межах.

Електрорушійна сила обмоток якоря машини постійного струму, В:

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (1.80)$$

де Φ – магнітний потік, Вб;

n – швидкість обертання якоря, об/хв;

C_e – конструктивна стала машини:

$$C_e = \frac{pN}{60a}, \quad (1.81)$$

де p – число пар полюсів машини;

N – число активних провідників обмотки якоря;

a – число паралельних віток обмотки якоря.

Напруга на затискачах генератора, В [3]:

$$U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma}, \quad (1.82)$$

де E – ЕРС обмотки якоря, В;

$I_{\text{я}}$ – струм якоря, А;

$R_{\text{я}\Sigma}$ – сумарний опір якірної обмотки, Ом.

Напруга на затискачах двигуна, В:

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} \quad (1.83)$$

Корисна потужність, що віддається генератором, Вт:

$$P_2 = U \cdot I_{\text{я}}.$$

Потужність, що споживається двигуном з мережі, Вт:

$$P_1 = U \cdot I_{\text{я}}. \quad (1.84)$$

Електромагнітна потужність, Вт:

$$P_{\text{ем}} = E \cdot I_{\text{я}}. \quad (1.85)$$

Струм якоря в генераторах із самозбудженням, А:

$$I_{\text{я}} = I + I_3, \quad (1.86)$$

де I_3 – струм збудження, А;

I – струм навантаження.

Струм якоря двигуна, А:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - C_e \cdot \Phi \cdot n}{R_{\text{я}}} . \quad (1.87)$$

Струм в колі збудження двигуна, А:

$$I_{\text{з}} = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{U - C_e \cdot \Phi \cdot n}{R_{\text{з}} + R_{\text{р}}} , \quad (1.88)$$

де R_{Σ} - загальний опір кола збудження, Ом;

$R_{\text{з}}$ – опір обмотки збудження, Ом;

$R_{\text{р}}$ – опір реостата в колі збудження, Ом.

Опір пускового реостата, Ом:

$$R_{\text{р}} = \frac{U}{I_{\text{ян}}} - R_{\text{я}} . \quad (1.89)$$

Частота обертання якоря двигуна, об/хв:

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} . \quad (1.90)$$

Частота обертання ідеального холостого ходу двигуна, об/хв:

$$n_x = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} R_{\text{я}}} , \quad (1.91)$$

де $n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання якоря, об/хв.;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга живлення двигуна, В;

$I_{\text{яном}}$ – номінальний струм якоря, А.

Механічна характеристика шунтового двигуна описується рівнянням [3]:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M R_{\text{я}}}{C_e C_{\text{м}} \Phi^2} = n_0 - \Delta n , \quad (1.92)$$

де $C_{\text{м}}$ – стала машини:

$$C_m = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (1.93)$$

n_0 – швидкість обертання двигуна в режимі холостого ходу ($M = 0$):

$$n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}, \quad (1.94)$$

Δn – зміна швидкості обертання двигуна при навантаженні.

$$\Delta n = \frac{MR_a}{C_e C_m \Phi^2}. \quad (1.95)$$

Механічна характеристика серієсного двигуна:

$$n = \frac{U}{C_e k_\Phi \sqrt{\frac{M}{C_m k_\Phi}}} - \frac{R_a}{C_e k_\Phi}, \quad (1.96)$$

де k_Φ – коефіцієнт пропорційності магнітного потоку.

Обертовий момент двигуна, Н·м:

$$M = C_m \Phi I_a \quad (1.97)$$

або

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n}. \quad (1.98)$$

Зв'язок між постійними машини:

$$C_m = 9,55 C_e. \quad (1.99)$$

Рівняння обертових моментів для сталого режиму роботи генератора має вигляд:

$$M_g = M_0 + M, \quad (1.100)$$

де M_g – момент, що прикладений до вала генератора первинним двигуном, Н·м:

$$M_{\epsilon} = \frac{P_1}{\omega}, \quad (1.101)$$

M – електромагнітний момент, який розвивається якорем, Н·м;

M_0 – електромагнітний обертовий момент, що відповідає втратам на тертя, які покриваються за рахунок механічної потужності, Н·м.

В неусталеному режимі, коли швидкість обертання генератора змінюється, виникає динамічний момент обертання

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.102)$$

де J – момент інерції обертчастих частин генератора.

Динамічний момент відповідає зміні кінетичної енергії обертчастих мас.

У загальному випадку, при $n \neq \text{const}$ для генератора,

$$M_{\epsilon} = M_0 + M + M_{\text{дин}}. \quad (1.103)$$

Статичний момент генератора:

$$M_c = M_0 + M. \quad (1.104)$$

Тоді рівняння моментів генератора:

$$M_{\epsilon} = M_c + M_{\text{дин}}. \quad (1.105)$$

Електромагнітний момент двигуна, Н·м:

$$M = \frac{P_{\epsilon m}}{\omega} \quad (1.106)$$

є рушійним і діє в напрямі обертання, витрачається на зрівноваження гальмівних моментів:

- 1) моменту M_0 , який відповідає втратам, що покриваються за рахунок механічної потужності;
- 2) M_{ϵ} – моменту навантаження на валу, створюваного робочою машиною або механізмом;
- 2) $M_{\text{дин}}$ – динамічного моменту.

При цьому

$$M_{\epsilon} = \frac{P_2}{\omega}. \quad (1.107)$$

Таким чином рівняння моментів двигуна,

$$M = M_0 + M_{\epsilon} + M_{дин} \quad (1.108)$$

або

$$M = M_c + M_{дин}. \quad (1.119)$$

Тоді

$$M_c = M_0 + M_{\epsilon} \quad (1.110)$$

є статичним моментом опору.

При усталеному режимі роботи, коли $n = \text{const}$ і $M_{дин} = 0$,

$$M = M_c. \quad (1.111)$$

Кратність струму:

$$k_I = \frac{I_n}{I_{ном}}, \quad (1.112)$$

де I_n – пусковий струм двигуна, А.

Кратність пускового моменту [10]:

$$k_M = \frac{M_n}{M_{ном}}, \quad (1.113)$$

де M_n – пусковий момент двигуна, Н·м;

$M_{ном}$ – номінальний момент двигуна, Н·м.

Коефіцієнт корисної дії генератора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{U \cdot I + \Sigma P}, \quad (1.114)$$

де P_2 – потужність на затискачах генератора, Вт;

P_1 – механічна потужність, підведена до генератора, Вт;

U – напруга на затискачах генератора, В;

I – струм навантаження, А.

Коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{U \cdot I - \Sigma P}{U \cdot I} = 1 - \frac{\Sigma P}{U \cdot I}, \quad (1.115)$$

де P_2 – потужність на валу двигуна, Вт;

P_1 – потужність, що споживається з мережі, Вт;

ΣP – сумарні втрати, Вт.

Сумарні втрати визначаються за формулою, Вт:

$$\Sigma P = P_x + P_e = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_z + \Delta P_y + \Delta P_{щ} + \Delta P_{\partial}, \quad (1.116)$$

де P_0 – втрати холостого ходу, Вт;

P_e – електричні втрати, Вт;

$\Delta P_{ст}$ – втрати в сталі, Вт;

$\Delta P_{мех}$ – механічні втрати, Вт;

ΔP_z – електричні втрати в обмотці збудження, Вт;

ΔP_y – втрати потужності в обмотці якоря, Вт;

$\Delta P_{щ}$ – втрати в щітках, Вт;

ΔP_{∂} – додаткові втрати, Вт.

1.3.2 Приклади розв'язування задач

№ 1.5  Двигун паралельного збудження, приєднаний до мережі з напругою $U_{ном} = 220$ В, споживає при номінальному навантаженні $I_{ном} = 20,5$ А, а при холостому ході – $I_0 = 2,35$ А. Опір обмотки якоря $R_y = 0,75$ Ом, а в колі збудження $R_z = 258$ Ом. Номінальна швидкість обертання $n_{ном} = 1025$ об/хв.

Визначити:

- номінальну потужність двигуна (на валу);
- номінальний ККД;
- номінальний обертовий момент;

- пусковий струм при пуску двигуна без пускового реостата;
- опір пускового реостата для умови $I_{np} = 2,5I_{яном}$;
- пусковий момент при пуску двигуна з реостатом.

Побудувати природну механічну характеристику двигуна. При розв'язанні вважати, що магнітні і механічні втрати не залежать від навантаження.

Розв'язування

1. Потужність, що споживається з мережі:

$$P_{1ном} = U_{ном} \cdot I_{ном} = 220 \cdot 20,5 = 4510 \text{ (Вт)}.$$

2. Струм збудження:

$$I_3 = \frac{U_{ном}}{R_3} = \frac{220}{258} = 0,85 \text{ (А)}.$$

3. Номінальний струм якоря:

$$I_{яном} = I_{ном} - I_3 = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ (А)}.$$

4. Втрати в обмотці якоря:

$$\Delta P_{я} = R_{я0} \cdot I_{яном}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 289,5 \text{ (Вт)}.$$

5. Втрати в обмотці збудження:

$$\Delta P_3 = R_3 \cdot I_3^2 = 258 \cdot 0,85^2 = 186,4 \text{ (Вт)}.$$

6. Магнітні і механічні втрати:

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_3,$$

де P_0 – втрати холостого ходу:

$$P_0 = U_{н} \cdot I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ (Вт)};$$

$\Delta P_{я0}$ – втрати в обмотці якоря при холостому ході двигуна:

$$\Delta P_{я0} = R_{я} (I_0 - I_3)^2 = 0,75(2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ (Вт)};$$

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = 517 - 1,7 - 186,4 = 328,9 \text{ (Вт)}.$$

7. Сумарні втрати:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{я} + \Delta P_3 + \Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = 289,5 + 186,4 + 328,9 = 804,8 \text{ (Вт)}.$$

8. Номінальна потужність на валу двигуна:

$$P_{ном} = P_{1ном} - \Sigma \Delta P = 4510 - 804,8 = 3705,2 \text{ (Вт)}.$$

9. Номінальний ККД:

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{P_{1ном}} = \frac{3705,2}{4510} = 0,82.$$

10. Номінальний обертовий момент:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{3705,2}{1025} = 34,5 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

11. Пусковий струм двигуна при запуску без реостата:

$$I_n = \frac{U_{ном}}{R_{я}} = \frac{220}{0,75} = 293,3 \text{ (А)}.$$

12. Опір пускового реостата:

$$R_n = \frac{U_{ном}}{I_{пр}} = \frac{U_{ном}}{2,5 I_{яном}} = \frac{220}{2,5 \cdot 19,65} = 4,48 \text{ (Ом)}.$$

13. Пусковий момент двигуна з пусковим реостатом визначається як

$$M_n = C_m \cdot \Phi \cdot I_{пр}.$$

Номінальний момент двигуна можна визначити і як

$$M_{ном} = C_m \cdot \Phi \cdot I_{яном}.$$

Якщо вважати магнітний потік в двигуні паралельного збудження постійним, то виконується співвідношення

$$\frac{M_{ном}}{M_n} = \frac{I_{яном}}{I_{пр}},$$

звідки

$$\begin{aligned} M_n &= M_{ном} \cdot \frac{I_{пр}}{I_{яном}} = M_{ном} \cdot \frac{2,5I_{яном}}{I_{яном}} = M_{ном} \cdot 2,5I_{яном} = \\ &= 34,5 \cdot 2,5 = 86,3 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \end{aligned}$$

14. Природна механічна характеристика $n = f(M)$ є прямою лінією і будується за двома точками:

1) в режимі холостого ходу при $M = 0$ частота обертання ідеального холостого ходу:

$$n_0 = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{яном} R_{я}} = 1025 \cdot \frac{220}{220 - 19,65 \cdot 0,75} = 1098,6 \text{ (об/хв)};$$

2) при номінальному навантаженні $M_{ном} = 34,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ швидкість обертання $n_{ном} = 1025 \text{ об/хв}$. (рис. 1.2).

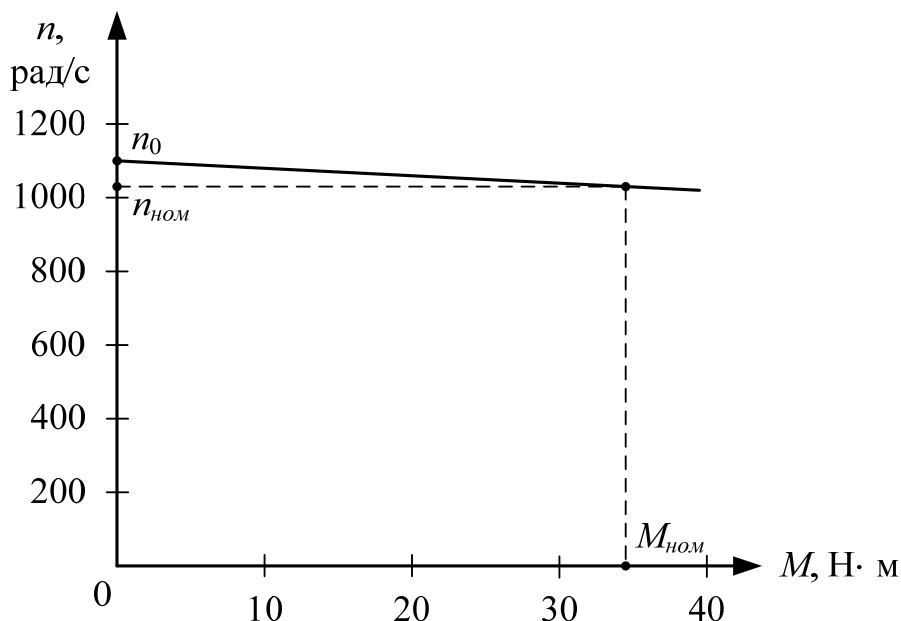


Рисунок 1.2 – Природна механічна характеристика двигуна постійного струму паралельного збудження



№ 1.6

Визначити швидкість обертання двигуна постійного струму П12 на холостому ході і номінальному навантаженні, якщо відомо, що регулювання здійснюється за рахунок зміни опору в колі збудження при значеннях магнітного потоку:

$$1) \Phi_{ном}; \quad 2) \Phi_1 = 0,8\Phi_{ном}; \quad 3) \Phi_2 = 0,5\Phi_{ном}.$$

Паспортні дані двигуна: $P_{ном} = 1$ кВт; $U_{ном} = 220$ В;
 $n_{ном} = 3000$ об/хв; $I_{яном} = 5,6$ А; $R_{я} = 2$ Ом; $\eta = 77\%$.

Розв'язування

1. Швидкість обертання двигуна на холостому ході і номінальному магнітному потоці (при нехтуванні механічними втратами):

$$n_0 = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{яном} R_{я}} = 3000 \cdot \frac{220}{220 - 5,6 \cdot 2} = 3160,9 \text{ (об/хв)}.$$

2. Швидкості обертання якоря і магнітні потоки пов'язані співвідношенням

$$n_{10} \Phi_1 = n_0 \Phi_{ном},$$

звідки швидкість обертання на холостому ході і пониженому магнітному потоці $\Phi_1 = 0,8\Phi_{ном}$:

$$n_{10} = \frac{n_0 \Phi_{ном}}{\Phi_1} = \frac{3160,9 \cdot 1}{0,8} = 3951,1 \text{ (об/хв)}.$$

3. Швидкість обертання на холостому ході і пониженому магнітному потоці $\Phi_2 = 0,5\Phi_{ном}$:

$$n_{20} = \frac{n_0 \Phi_{ном}}{\Phi_2} = \frac{3160,9 \cdot 1}{0,5} = 6321,8 \text{ (об/хв)}.$$

4. Для визначення швидкості обертання при номінальному моменті і пониженому магнітному потоці спочатку визначають перепад швидкості обертання між холостим ходом і номінальним навантаженням. Перепад швидкості обертання:

$$\Delta n_1 = (n_0 - n_{ном}) \cdot \left(\frac{\Phi_{ном}}{\Phi_1} \right)^2 = (3160 - 3000) \cdot \left(\frac{1}{0,8} \right)^2 = 251,4 \text{ (об/хв)},$$

$$\Delta n_2 = (n_0 - n_{ном}) \cdot \left(\frac{\Phi_{ном}}{\Phi_2} \right)^2 = (3160 - 3000) \cdot \left(\frac{1}{0,5} \right)^2 = 643,7 \text{ (об/хв)}.$$

Швидкість обертання при номінальному моменті і магнітному потоці $\Phi_1 = 0,8\Phi_{ном}$:

$$n_{1ном} = n_{10} - \Delta n_1 = 3951,1 - 251,4 = 3699,7 \text{ (об/хв)},$$

теж при магнітному потоці $\Phi_2 = 0,5\Phi_{ном}$:

$$n_{2ном} = n_{20} - \Delta n_2 = 6321,8 - 643,7 = 5678,2 \text{ (об/хв)}.$$

При відомій швидкості обертання холостого ходу і номінальній швидкості обертання для даного магнітного потоку можна побудувати механічні характеристики двигуна при зміні основного магнітного потоку.

1.3.3 Запитання для самоперевірки



1. Поясніть принцип дії машини постійного струму в режимах генератора і двигуна. Яка роль електромагнітного моменту і ЕРС в цих режимах?
2. Поясніть будову і призначення основних частин машини постійного струму.
3. Напишіть формулу ЕРС і формулу електромагнітного моменту машини постійного струму.
4. Поясніть фізичну суть явища реакції якоря.
5. Поясніть фізичні процеси при комутації.
6. Поясніть вплив додаткових полюсів на комутацію.
7. Напишіть формули, що характеризують роботу генератора постійного струму.
8. Зобразіть схеми генераторів незалежного, паралельного і змішаного збудження, покажіть на них струми та ЕРС.
9. Вкажіть умови, при яких знімається характеристика холостого ходу. Поясніть вигляд характеристики.

10. Порівняйте зовнішні характеристики різних типів генераторів і поясніть різницю між ними.
11. Поясніть процес самозбудження генераторів постійного струму.
12. Напишіть формули, що характеризують роботу двигуна постійного струму.
13. Виведіть рівняння механічної характеристики двигуна постійного струму.
14. Зобразіть схеми двигунів паралельного, послідовного і мішаного збудження. Покажіть на них струми і ЕРС.
15. На прикладі двигуна паралельного збудження поясніть фізичні процеси і особливості пуску в хід двигуна постійного струму.
16. Зобразіть і поясніть механічні характеристики двигуна паралельного і послідовного збудження.
17. В якому випадку і чому можливий "рознос" двигуна паралельного збудження, послідовного збудження?
18. Перерахуйте способи регулювання швидкості обертання двигунів паралельного і послідовного збудження, їх переваги і недоліки.
19. Як виконується реверсування двигунів?

1.3.4 Контрольні задачі



Задача 1.12
(варіанти 0-19)

Двигун паралельного збудження, номінальна напруга якого $U_{ном}$, при номінальному навантаженні споживає струм $I_{ном}$, а при холостому ході I_0 . Номінальна частота обертання $n_{ном}$, опір обмотки якоря $R_{я}$, опір кола збудження R_z . Магнітні і механічні втрати вважати постійними при всіх режимах роботи двигуна (табл. 3.1). Визначити: номінальну потужність двигуна P_n на валу, номінальний обертальний момент M_n , номінальний ККД η_n , значення пускового моменту при струмі $I_{пуск} = 2I_n$ і відповідний опір пускового реостата, а також частоту обертання якоря при $I_{ян}$, але при введеному в коло збудження додатковому опорі, що збільшує дане в умові задачі значення R_z на 30%. Побудувати природну і штучну механічні характеристики двигуна.

Таблиця 1.12 – Вихідні дані до задачі 1.12

Вар.	Дані для розрахунку					
	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$I_0,$ А	$R_{я},$ Ом	$R_z,$ Ом	$n_{ном},$ об/хв
0	220	15	1,6	1,2	180	1025
1	220	53	6,3	0,212	33	1225
2	115	10	9,5	0,11	50	1000
3	110	26,7	30,0	0,04	27,5	1100
4	220	16,3	1,78	0,16	75	1025
5	110	7,8	0,7	0,8	210	1240
6	220	19,9	2,0	1,5	150	960
7	110	35	3,2	0,6	60	1400
8	220	32	2,8	0,94	120	1600
9	220	34	3,0	0,45	110	1100
10	110	9,5	0,9	1,9	200	850
11	110	20	1,8	0,7	80	940
12	220	15	1,5	0,82	200	1350
13	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
14	220	20,5	2,35	0,74	258	1025
15	220	40	4,2	0,52	190	1420
16	110	10,5	1,2	1,2	160	960
17	110	18,6	2,0	0,9	120	825
18	220	16	1,8	0,6	270	1600
19	220	32	3,5	0,62	200	1350



Задача 1.13
(варіанти 0-19)

Двигун паралельного збудження, номінальна напруга якого $U_{ном}$, розвиває номінальну потужність $P_{ном}$. Номінальна частота обертання якоря $n_{ном}$ і номінальний ККД $\eta_{ном}$. Втрати потужності в колі якоря $\Delta P_{я}$ і в колі збудження ΔP_z задані в процентах від потужності, що споживається двигуном з мережі $P_{1ном}$ (табл. 1.13).

Визначити:

➤ струм в колі збудження, струм якоря при

номінальному навантаженні $I_{яном}$;

- пусковий момент при запуску двигуна з пусковим реостатом;
- швидкість обертання якоря при номінальному моменті на валу двигуна і ввімкненні в коло якоря додаткового опору значенням $3R_{я}$.

Побудувати природну і реостатну механічні характеристики двигуна.

Таблиця 1.13 – Вихідні дані до задачі 1.13

Вар.	Дані для розрахунку					
	$U_{ном},$ В	$P_{ном},$ кВт	$\Delta P_{я},$ %	$\Delta P_{з},$ %	$n_{ном},$ об/хв	$\eta_{ном},$ %
0	110	6,0	5,2	4,8	980	86,5
1	220	10	5,0	4,8	2250	86,0
2	220	4,0	6,2	4,2	1025	82,2
3	220	6,6	6,2	4,1	2400	85,5
4	220	4,4	6,5	4,8	2100	84,5
5	220	2,5	5,8	4,8	1000	85,0
6	220	10,0	5,3	4,4	2250	83,0
7	110	7,7	5,0	4,2	1050	85,5
8	110	8,0	5,4	4,5	1150	85,8
9	110	9,2	5,3	4,1	970	86,5
10	110	6,6	6,2	5,0	1050	85,5
11	110	3,5	6,3	5,2	2200	84,5
12	110	4,5	5,7	4,6	1500	85,0
13	220	15	5,0	4,0	1000	84,5
14	220	10	5,2	4,2	970	85,5
15	220	5,8	6,0	5,0	2200	84,0
16	220	19	4,8	4,5	980	86,5
17	220	29	5,0	4,3	2520	86,0
18	220	46,5	5,4	4,8	1025	82,2
19	220	14	4,0	4,6	2400	84,0

2 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Загальні відомості

Електроприводом (electric drive) називається електромеханічна система, яка складається із електродвигуна або декількох електродвигунів, передавального механізму і всієї апаратури для керування електродвигуном.

При вивченні даної теми необхідно ознайомитися з методами вибору типу і потужності електродвигунів для привода різних механізмів. Необхідно мати чітке уявлення про режими роботи і про вплив режиму роботи на нагрівання електродвигуна, а відповідно і на максимальну потужність.

2.1.1 Вибір двигуна за потужністю для тривалого режиму роботи

Тривалий режим роботи (long term mode of operation) – режим, при якому електропривод працює без зупинки, а двигун нагрівається до усталеної температури [11]. Навантаження при цьому може бути постійним (рис. 2.1, а) або таким, що мало змінюється, а також змінним (рис. 2.2, б).

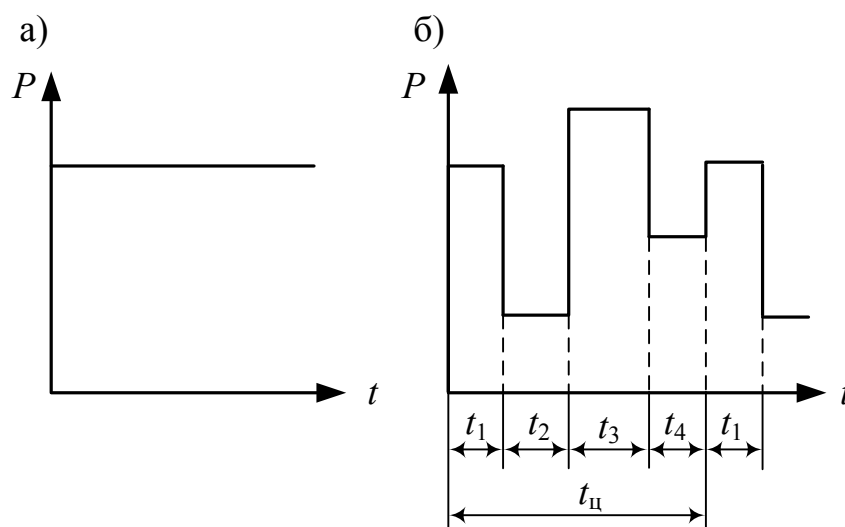


Рисунок 2.1 – Навантажувальні діаграми електропривода при постійному (а) і змінному (б) тривалому навантаженні

Тривалий режим роботи (S1) характерний для більшості електроприводів. Для такого режиму роботи номінальною потужністю

двигуна є корисна потужність, яку двигун може розвивати на валу при тривалому режимі роботи і номінальних умовах не перегріваючись вище допустимої температури.

Для електроприводів з постійним або з навантаженням, що мала змінюється, потужність двигуна знаходиться за відомими формулами для визначення потужності робочої машини з врахуванням ККД передачі.

При змінному тривалому навантаженні використовуються методи:

- середніх втрат;
- еквівалентних величин (струму, моменту, потужності).

2.1.1 Метод середніх втрат

За навантажувальною діаграмою електропривода $P = f(t)$ (рис. 2.1, б) наближено потужність двигуна приймають рівною середній потужності навантаження, помноженій на коефіцієнт запасу $1,1 \div 1,3$.

Після вибору двигуна (з врахуванням частоти обертання) визначаються втрати

$$\Delta P = P \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (2.1)$$

на ділянках діаграми і будується залежність $\Delta P = f(t)$. Тоді середні втрати за цикл (рис. 2.1, б)

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^k t_i}. \quad (2.2)$$

Отримані втрати порівнюють з номінальними $\Delta P_{ном}$ попередньо вибраного двигуна. Якщо $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}$ і двигун підходить за пусковим моментом і допустимим перевантаженням, то він вибраний правильно. Якщо умова не виконується, то за каталогом вибирається двигун більшої потужності і розрахунок повторюється.

2.1.2 Метод еквівалентних величин

Якщо навантажувальна діаграма двигуна задана у вигляді зміни струму в функції часу, то двигун вибирається за його еквівалентним значенням:

$$I_e = \frac{\sum_{i=1}^k I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^k t_i}. \quad (2.3)$$

Якщо навантажувальна діаграма задана залежностями $M = f(t)$ або $P = f(t)$, то використовуються методи еквівалентного моменту або потужності:

$$M_e = \frac{\sum_{i=1}^k M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^k t_i}, \quad (2.4)$$

$$P_e = \frac{\sum_{i=1}^k P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^k t_i}. \quad (2.5)$$

Вибраний двигун задовольняє умови нагріву, якщо виконуються умови:

$$I_e \leq I_{ном}, \quad M_e \leq M_{ном}, \quad P_e \leq P_{ном}. \quad (2.6)$$

2.1.2 Вибір електродвигуна за потужністю для короткочасного режиму роботи

При короткочасному режимі (S2) (short term mode operation) двигун електропривода вмикається епізодично на короткий час роботи, за час якої не встигає нагрітися до усталеної роботи, а протягом наступного тривалого проміжку часу перебуванні в стані очікування охолоджується до температури навколишнього середовища (рис. 2.2).

Номінальною потужністю електродвигуна при короткочасному режимі є найбільша потужність, з якою він може працювати обмежений час, не перегріваючись вище допустимої температури.

Одним з основних параметрів таких електродвигунів є відносна *тривалість включення* (ТВ) (duration of switching on), що вимірюється в відсотках,

$$TB = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

де t_p – час роботи двигуна під навантаженням;

t_{Σ} – час циклу, що рівний сумарному часу роботи і паузи двигуна.

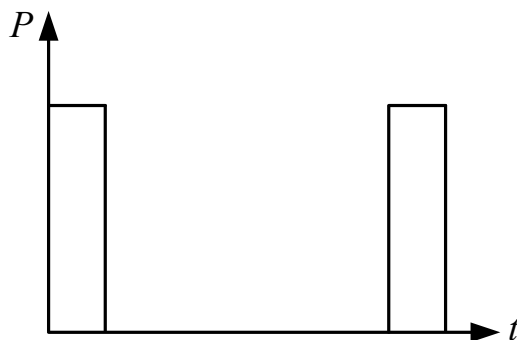


Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма електропривода при короткочасному режимі роботи

Для короткочасного режиму номінальними TB є 10, 30, 60 і 90 хв. роботи.

Вибір двигуна за тепловим нагрівом при короткочасному навантаженні P зводиться до вибору двигуна за каталогом з врахуванням тривалості роботи і частоти обертання на основі умови $P_{ном} \geq P_e$. Якщо протягом робочого періоду навантаження змінюється, то попередньо визначається за формулою (2.5) еквівалентна потужність. Вибраний двигун повинен бути перевірений на умови пуску та перевантаження.

2.1.3 Вибір електродвигуна за потужністю для повторно-короткочасного режиму роботи

В повторно-короткочасному режимі (repeating-short term process) роботи (S3) робочі періоди електропривода періодично чергуються із зупинками, але тривалість циклу не повинна перевищувати 10 хв. Якщо час циклу більший 10 хв., то електродвигун необхідно вибирати так само, як і для тривалого режиму роботи.

Прикладом навантажувальної діаграми такого режиму роботи електродвигуна може бути діаграма, подана на рис. 2.3.

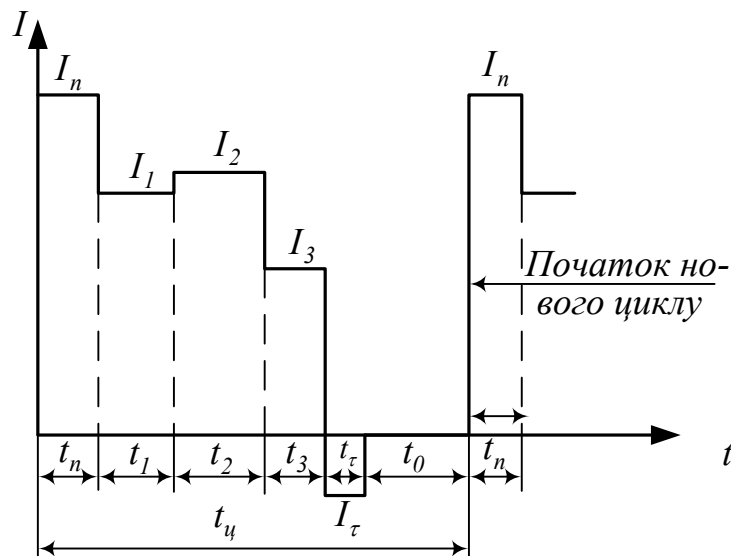


Рисунок 2.3 – Навантажувальна діаграма електропривода при повторно-короткочасному режимі роботи

За час одного періоду роботи електродвигун не нагрівається до встановленого значення, а за час однієї паузи не встигає остигнути до температури, що рівна температурі навколишнього середовища.

Для двигунів, що призначені для повторно-короткочасного режиму роботи, в каталогах дається декілька значень TB : 15%, 25%, 40%, 60% і 100% та відповідні цим TB номінальні значення потужності електродвигуна. При роботі електродвигуна при даній $TB_{ном}$ і відповідному йому значенні номінальної потужності забезпечується повне використання електродвигуна за нагрівом. TB , що дорівнює 100%, відповідає роботі електродвигуна в тривалому режимі роботи.

Номінальною потужністю електродвигуна для повторно-короткочасного режиму роботи є найбільша потужність, при якій двигун ефективно може працювати за номінальних умов тривалий час, не перегріваючись вище допустимої температури.

Вибір потужності електродвигуна при повторно-короткочасному режимі роботи в дійсності зі заданим графіком навантаження може бути зроблений за методами еквівалентного струму, еквівалентного моменту чи еквівалентної потужності. При розрахунку за цими формулами час паузи не враховують, тому що вона вже врахована тривалістю включення. При цьому, якщо фактична відносна тривалість включення TB виявляється рівною чи близькою до одного з ряду номінальних значень $TB_{ном}$, то вибір

потужності електродвигуна за еквівалентним значенням струму, моменту або потужності не складає труднощів.

Для вибраного електродвигуна повинні виконуватися умови (2.6). При цьому $TB = TB_{ном}$.

В багатьох практичних випадках фактична тривалість включення TB відрізняється від номінальної $TB_{ном}$. В цих випадках вибір електродвигуна дещо ускладнюється, оскільки при $TB_{ном} > TB$, то при номінальній тривалості включення, що більша фактичного її значення, вибраного за еквівалентним значенням струму, потужності або моменту електродвигун виявиться не повністю використаним за нагрівом, а при $TB_{ном} < TB$ вибраний таким чином двигун буде перенавантаженим.

Якщо фактична тривалість включення TB відрізняється від номінальної $TB_{ном}$, то фактичний еквівалентний струм I_e , еквівалентний момент M_e чи еквівалентна потужність P_e з достатньою для практики точністю можуть бути перераховані на ближню (більшу чи меншу) номінальну тривалість включення $TB_{ном}$ відповідно до формул:

$$I'_e = I_e \sqrt{\frac{TB}{TB_{ном}}}, \quad (2.3)$$

$$P'_e = P_e \sqrt{\frac{TB}{TB_{ном}}}, \quad (2.4)$$

$$M'_e = M_e \sqrt{\frac{TB}{TB_{ном}}}, \quad (2.5)$$

де I'_e , P'_e , M'_e – відповідно еквівалентні значення струму, потужності і моменту, перераховані на ближче значення $TB_{ном}$, що пропонується каталогом.

Далі за еквівалентним значенням струму, потужності чи моменту методом, викладеним вище, визначають потрібну потужність електродвигуна.

При $TB > 60\%$ часто вибирається двигун, призначений для тривалого режиму роботи, а при $TB < 10\%$ – двигун, призначений для короткочасного режиму роботи.

2.2 Приклади розв'язування задач



№ 2.1

Асинхронний електродвигун розрахований для роботи в повторно-короткочасному режимі з $TB = 25\%$ при потужності $P_{ном25} = 10$ кВт.

Визначити потужність, яку електродвигун може розвинути, не перегріваючись, більше допустимого значення, при відносній тривалості включення $TB = 60\%$.

Розв'язування

$$P_{60} = P_{ном25} \sqrt{\frac{TB_{25}}{TB_{60}}} = 10 \sqrt{\frac{25}{60}} = 6,46 \text{ (кВт)}.$$



№ 2.2

Асинхронний трифазний електродвигун призначений для роботи в повторно-короткочасному режимі за графіком навантаження, що представлений на рис. 2.4 при номінальній швидкості обертання $n_{ном} = 975$ об/хв.

Вибрати за каталогом електродвигун, що забезпечує даний режим роботи без врахування пускових втрат.

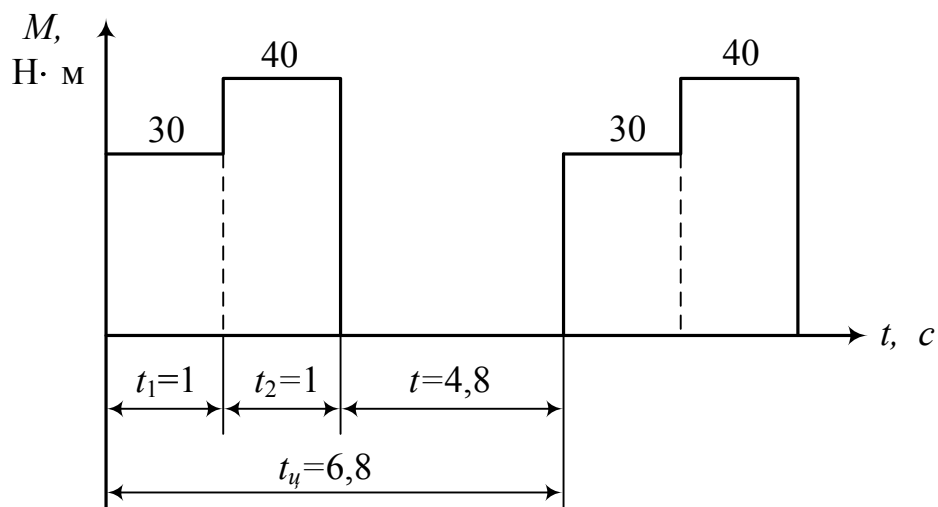


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма до задачі № 2.2

Розв'язування

1. Еквівалентний момент навантаження – момент навантаження електродвигуна:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{30^2 \cdot 1 + 40^2 \cdot 1}{1 + 1}} = 35,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

2. Значення TB , що відповідає заданому режиму роботи:

$$TB = \frac{t_1 + t_2}{t_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{1 + 1}{6,8} \cdot 100 = 29,4 \text{ (\%)}.$$

3. Значення TB до номінального значення $TB_{ном} = 25\%$:

$$M_{25} = M_{30} \sqrt{\frac{TB_{30}}{TB_{25}}} = 35,4 \cdot \sqrt{\frac{30}{25}} = 38,7 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

4. Потужність електродвигуна, що відповідає $TB_{ном} = 25\%$:

$$P_{25} = \frac{M_{25} \cdot n_{ном}}{9,55} = \frac{38,7 \cdot 975}{9,55} = 3954 \text{ (Вт)}.$$

5. Вибираємо за каталогом електродвигун МТ21-6, що має такі номінальні дані: $P_{ном} = 5 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 940 \text{ об/хв}$; $\eta_{ном} = 74,5\%$; $\cos\varphi = 0,68$; $TB_{ном} = 25\%$; $\lambda = 2,5$.

6. Перевіримо вибраний електродвигун за максимальним моментом, тобто на перевантажувальну здатність, виходячи з умови $M_e \leq M_{ном}$.

Номінальний момент вибраного двигуна:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{5000}{940} = 50,8 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Отже, вибраний електродвигун відповідає заданим режимам роботи.



Цеховий мостовий кран має підйомну лебідку, що розрахована на підйом $h = 16 \text{ м}$ вантажу вагою $G_B = 5 \text{ т}$. Лебідка розрахована

№ 2.3

на підйом вантажу з швидкістю $v = 2$ м/с на висоту і спускання гака вагою $G_2 = 100$ кг без вантажу з тією ж швидкістю. Пауза між спуском і підйомом, а також між підйомом і спуском t_0 складає 5 с, ККД передачі лебідки $\eta_l = 0,95$.

Визначити потужність, що споживається електродвигуном підйому і спуску лебідки, без врахування втрат при пуску і гальмуванні. Вибрати електродвигун за каталогом з врахуванням того, що передаточне число лебідки $K = 7,9$, а діаметр барабана, на який намотується трос, $D_6 = 0,5$ м.

Розв'язування

1. Потужність, що необхідна для підйому вантажу:

$$P_1 = \frac{(G_6 + G_2) \cdot v}{102 \cdot \eta_l} = \frac{(5000 + 100) \cdot 2}{102 \cdot 0,95} = 105 \text{ (ккВт.)}$$

2. Потужність, що споживається при опусканні пускового гаку:

$$P_2 = \frac{G_2 \cdot v}{102 \cdot \eta_l} = \frac{100 \cdot 2}{102 \cdot 0,95} = 2 \text{ (ккВт.)}$$

3. Час підйому вантажу t_1 і час опускання гаку t_2 :

$$t_1 = t_2 = h/v = 16/2 = 8 \text{ (с.)}$$

4. За даними розрахунку будуюмо навантажувальну діаграму для лебідки крана (рис. 2.5).

5. З графіка, що поданий на рис. 2.5, визначаємо значення еквівалентної потужності:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{t_1 + t_0 + t_2 + t_0}} = \sqrt{\frac{105^2 \cdot 8 + 2^2 \cdot 8}{8 + 5 + 8 + 5}} = 58 \text{ (ккТ.)}$$

6. Число обертів двигуна:

$$n_l = \frac{K \cdot 60v}{\pi \cdot D_6} = \frac{7,9 \cdot 60 \cdot 2}{3,14 \cdot 0,5} = 600 \text{ (об/хв.)}$$

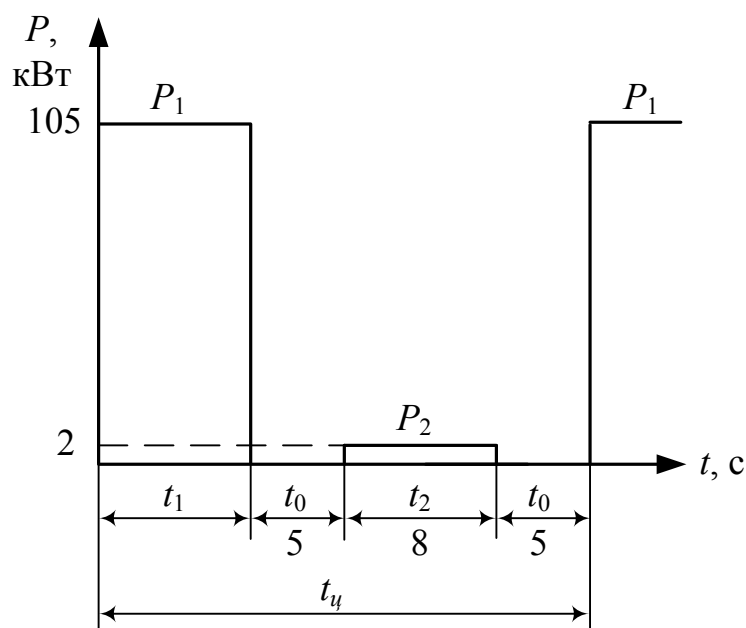


Рисунок 2.5 – Навантажувальна діаграма до задачі № 2.3

7. В дійсності з умовами роботи вибираємо за каталогом крановий асинхронний електродвигун з контактними кільцями типу 4АНК280М10У3 з номінальними даними: $P_n = 55$ кВт; $n_n = 588$ об/хв; $U_n = 380$ В; $\cos\varphi = 0,79$; $\eta_n = 0,895$; $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n} = 2,2$.

8. Перевіряємо вибраний двигун за умовою перевантажувальної здатності:

$$0,9M_{\max} \geq M_{ст}.$$

Для цього визначимо:

а) номінальний момент вибраного двигуна:

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} = 9550 \cdot \frac{55}{588} = 893 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

б) максимальний момент двигуна:

$$M_{\max} = \lambda M_n = 2,2 \cdot 893 = 1965 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

в) статичний момент:

$$M_c = 9550 \frac{P_{\max}}{n_n} = 9550 \frac{P_1}{n_n} = 9550 \cdot \frac{105}{588} = 1705 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Перевіряємо умову:

$$0,9 \cdot 1965 = 1768 > 1705,$$

умова виконується.

2.3 Запитання для самоперевірки



1. Які типи електроприводів ви знаєте?
2. Напишіть рівняння руху електропривода.
3. Поясніть, як здійснюється приведення моментів і сил до вала електродвигуна.
4. Зобразіть механічні характеристики широкорозповсюджених виробничих механізмів.
5. Які ви знаєте режими роботи виробничих механізмів?
6. Обґрунтуйте, від яких причин залежить вибір приведеного електродвигуна за типом і родом струму.
7. Обґрунтуйте суть методу еквівалентних значень струму і моменту для вибору потужності двигуна.
8. Поясніть, як виконується розрахунок потужності і вибір двигуна для тривалого режиму роботи.
9. Обґрунтуйте, як виконується розрахунок потужності і вибір двигуна для короткочасного і повторно-короткочасного режимів роботи.

2.4 Контрольні задачі



Задача ЕП.1
(варіанти 0-25)

Для заданого в табл. 2.1 режиму навантаження виробничого механізму побудувати навантажувальну діаграму $P = f(t)$ і вибрати потужність (див. додаток А) короткозамкненого двигуна.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до задачі ЕП.1

Вар.	Дані для розрахунку									
	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_4 , с	t_5 , с	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	P_4 , кВт	P_5 , кВт
0	20	10	50	20	15	25	10	0	13,5	8
1	18	30	10	20	23,5	8	5	0	25	10
2	60	100	10	45	30	8	4	15	10	25
3	30	15	60	60	10	25	10	0	18	30
4	50	20	40	50	45	0	4	8	0	5
5	15	25	20	35	30	15	4	30	15	10
6	10	75	60	50	10	30	5	0	15	25
7	7	3	15	4	12	6	20	3	15	30
8	1	1,5	2,5	1,5	1,5	8	6	0	4	3,5
9	1,5	4	2,5	3,5	3	20	10	6	8	8
10	20	10	50	10	15	20	10	6	8	8
11	18	30	10	20	23,5	8	6	0	4	3,5
12	60	100	10	45	3,0	8	4	15	10	25
13	30	15	60	60	10	6	20	13	15	30
14	30	20	40	50	45	30	5	0	15	25
15	15	25	10	35	30	8	6	0	4	3,5
16	10	75	60	50	10	15	4	30	15	10
17	7	3	15	4	20	0	4	8	0	5
18	1	1,5	2,5	1,5	1,5	10	10	0	18	30
19	1	4	2,5	3,5	3	8	4	15	10	25
20	20	10	50	10	15	8	6	0	4	3,5
21	18	30	10	20	23,5	20	10	6	8	8
22	60	100	10	45	30	26	20	13	15	30
23	30	15	60	60	10	30	5	0	15	25
24	50	20	40	50	45	15	4	30	15	10
25	15	25	10	35	30	0	4	8	0	5



Задача ЕП.2
(варіанти 1-10)

Режим роботи станка заданий графіком, що наведений на рис. 2.6. Визначити потужність і вибрати трифазний асинхронний короткозамкнений двигун для його привода, якщо швидкість обертання вала двигуна повинна бути близькою до n (табл. 2.2).

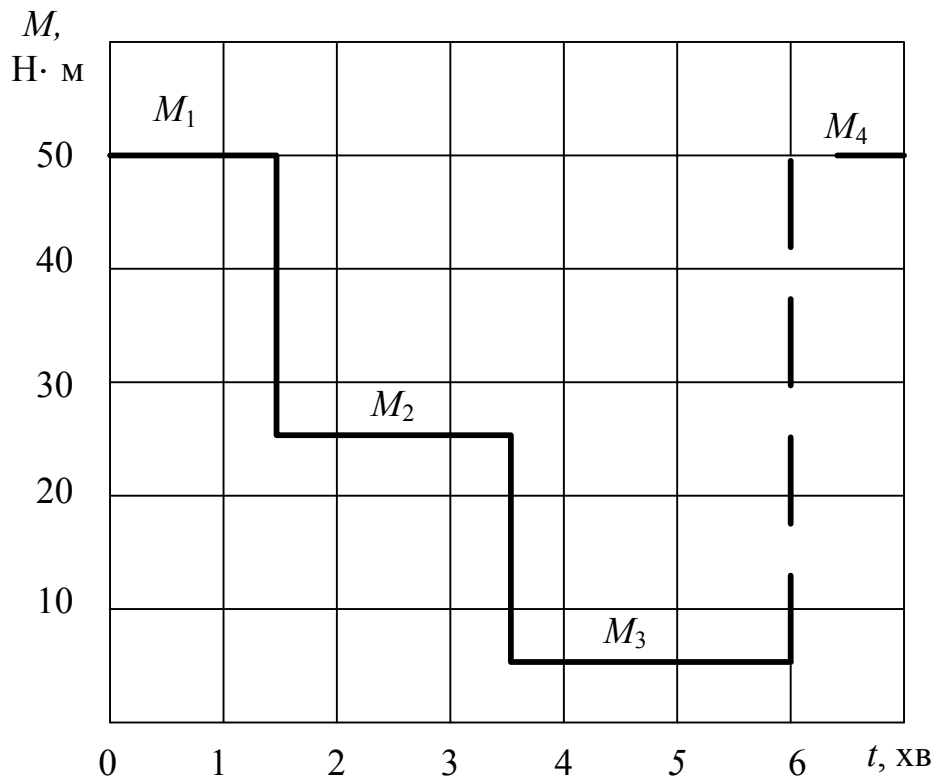


Рисунок 2.6 – Навантажувальна діаграма до задачі ЕП.2

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до задачі ЕП.2

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n , об/хв	900	950	1460	2970	1480	1410	2920	730	2890	710



Задача ЕП.3
(варіанти 1-10)

Розрахувати потужність електродвигуна насоса з номінальною продуктивністю Q і швидкістю обертання $n_{ном}$ при розрахунковому напорі H (табл. 2.3). Питома вага речовини, що перекачується γ , ККД насоса $\eta_{ном}$, коефіцієнт завантаження насоса K_3 .

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до задачі ЕП.3

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q , м ³ /ч	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
$n_{ном}$, об/хв	920	1450	920	1450	920	1450	920	1450	920	1450
H , м	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
γ , кгс/дм ²	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
K_3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	0,55	0,65	0,75	0,85	0,9

3 ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Лінії електропередач

Система електрозабезпечення (system for electric power supply) призначена для забезпечення електричною енергією всіх галузей народного господарства: будівельного, аграрного та сільськогосподарського комплексу, промисловості, побуту, де встановлені машини, агрегати, установки, в яких відбувається перетворення електричної енергії в механічну роботу, тепло, освітлення і т. і. [8].

При цьому виникає потреба в розрахунках електричних мереж (electric nets). Розрахунок електричних мереж, за якими здійснюється електропостачання, проводиться за двома основними *критеріями* – *нагріванням і спадом напруги*.

Вибраний поперечний переріз електричної лінії передач повинен задовольняти вимоги нагрівання і вимоги спаду напруг, а не лише одну з них.

В зв'язку з чим розрахунок поперечного перерізу здійснюється в такій послідовності:

- визначається номінальний струм споживача та з довідника вибирається поперечний переріз проводу за допустимою густиною струму за умови нагрівання;
- після вибору поперечного перерізу проводу робиться перевірка його на допустимий спад напруги.

Кінцевою метою розрахунку проводів за нагріванням є визначення допустимого значення сили струму в них.

Температура вибраного проводу або кабелю не повинні перевищувати допустимої, бо в протилежному випадку порушується стан ізоляції і механічна міцність дротів.

Для найкращої роботи електроспоживачів напруга на них повинна мати номінальне значення. Наявність електричних мереж, які з'єднують джерело електричної енергії і споживача, призводить до втрат напруги в них, що призводить до неможливості підтримки номінальної напруги на затискачах споживача простими засобами, тому в дійсності напруга на затискачах споживача відрізняється від номінальної. Відхилення від

номінальної напруги згідно з діючими правилами улаштування електроустановок не повинно перевищувати певних значень.

Так для електричних мереж освітлення напруга на найбільш віддаленій точці повинна бути не меншою $2,5\%U_{ном}$.

Для силових електричних кіл, ця межа складає не більше $5\%U_{ном}$ в меншу сторону від номінальної.

Відхилення напруги від номінального значення призводить до зниження світлового потоку напруги, зміни моменту двигунів постійного струму прямо пропорційно напрузі, а моменту асинхронних двигунів прямо пропорційно квадрату напруги.

Розрахунок електричних мереж змінного струму як за умовами нагріву, так і за умовами втрат напруги принципово не відрізняється від розрахунку мереж постійного струму, однак розрахункова формула втрати напруги в мережі змінного струму повинна враховувати не тільки активний опір лінії, але й реактивний.

Введемо позначення: L – довжина лінії (км); R , x , – активний та індуктивний опори лінії (Ом); U_1 і U_2 – напруги на початку і в кінці лінії (В); I – струм навантаження (А); $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності навантаження.

Припустимо, що значення U_2 , I і $\cos\varphi$ відомі. Побудуємо векторну діаграму.

Будувати векторну діаграму почнемо з вектора напруги в кінці лінії $\dot{U}_2$ (рис. 3.1). Вибравши масштаб напруг, відкладаємо значення напруг $\dot{U}_2$ (відрізок $0a$) вертикально вгору. Під заданим кутом φ_2 в сторону відставання від вектора напруги $\dot{U}_2$ будуємо вектор струму навантаження $\dot{I}_1$. Вектор напруги на початку лінії $\dot{U}_1$ повинен відрізнятись від вектора напруги $\dot{U}_2$ на значення втрати напруги в активному R та індуктивному X опорах. Вектор активного спаду напруги на лінії $\Delta\dot{U}_a = RI$ повинен бути направлений за направленням струму. Нанесемо його на векторну діаграму (відрізок ab). Вектор індуктивного спаду напруги в лінії $\Delta\dot{U}_x = XI$ повинен випереджати струм на кут $\pi/2$. Нанесемо його на векторну діаграму (відрізок bd). Тепер, з'єднавши точки a і d , отримаємо вектор спаду напруги $\Delta\dot{U}$, а вектор $0d$ є не що інше, як напруга на початку лінії

$\dot{U}_1$. Таким чином, під спадом напруги в лінії змінного струму розуміють геометричну різницю векторів напруг на початку і в кінці лінії.

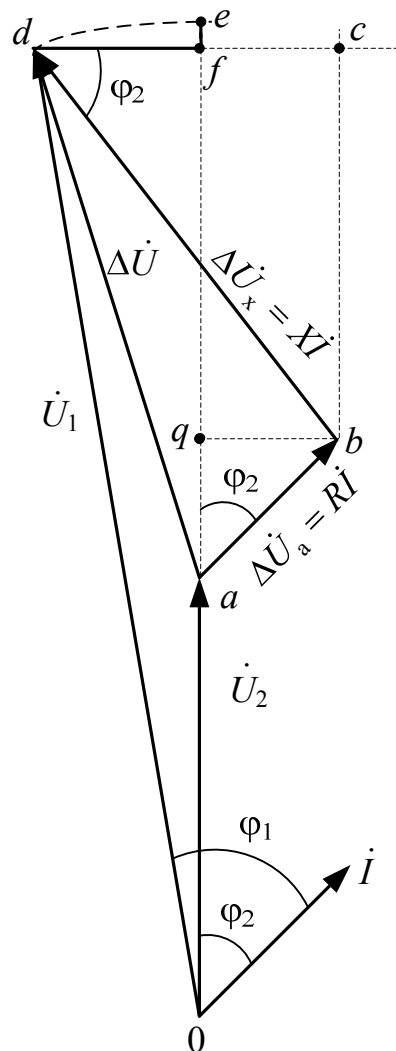


Рисунок 3.1 – Векторна діаграм

В практичних розрахунках ліній змінного струму користуються поняттям втрати напруги, під яким розуміють алгебраїчну різницю векторів напруги на початку і в кінці лінії.

Алгебраїчна різниця між векторами $\dot{U}_1$ і $\dot{U}_2$ може бути зображена відрізком ae , де точка e виходить на перетині прямої, що продовжує вектор $\dot{U}_2$, і дуги окружності з центром в точці 0 радіусом $\dot{U}_1$. Для простоти розрахунків за втратою напруги в лінії змінного струму остаточно

приймають проекцію вектора спаду напруги $\Delta \dot{U}$ на продовженні вектора $\dot{U}_2$, тобто відрізок af .

Роблячи додаткові побудови на векторній діаграмі і вводячи точки c і q , бачимо, що значення втрат напруги може бути подано у вигляді

$$\Delta \dot{U} = af; \quad af = aq + qf = \Delta U_a \cos \varphi_2.$$

Враховуючи, що

$$\Delta \dot{U}_a = R \dot{I}, \quad (3.1)$$

$$\Delta \dot{U}_x = X \dot{I}, \quad (3.2)$$

отримаємо

$$\Delta U = RX \cos \varphi_2 + XI \sin \varphi_2. \quad (3.3)$$

Якщо кут зсуву за фазою між напругою та струмом навантаження позначити через φ і ввести поняття питомих опорів лінії r_0 і x_0 , тобто

$$X = Lx_0; \quad R = Lr_0, \quad (3.4)$$

то розрахункова формула втрати напруги на фазі прийме вигляд:

$$\Delta U = I \cdot L \cdot (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \quad (3.5)$$

або у відсотках

$$\Delta U\% = \frac{I \cdot L}{U_{ном}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi), \quad (3.6)$$

а для лінійної втрати напруги

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{ном}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100. \quad (3.7)$$

Останню формулу необхідно запам'ятати і вміти нею користуватися.

3.1.2 Захист проводів електричних мереж від дії струмів короткого замикання

Відповідно до правил улаштування електроустановок електричні мережі напругою до 1000 В, які прокладаються як всередині, так і ззовні будівель, повинні мати захист від струмів короткого замикання (СКЗ) з мінімальним часом відключення, що відповідає по можливості вимогам селективності. Для захисту мереж від напруг 1000 В можна застосовувати запобіжники з плавкими вставками та різного типу автоматичні вимикачі. Струм плавкої вставки (current of fusible insert) запобіжника, який призначений для захисту мережі від СКЗ, потрібно вибрати таким чином, щоб дотримувалось відношення:

$$\frac{I_{пл.вст}}{I_{дон}} \leq 3, \quad (3.8)$$

де $I_{пл.вст}$ – струм плавкої вставки;

$I_{дон}$ – допустимий струм (admissible current) для даного перерізу проводу.

Запобіжники і автомати також можуть захищати електричні мережі від струмів перенавантаження. Відповідно до правил улаштування електроустановок освітлювальні мережі й мережі побутових та пересувних електроприймачів в житлових, громадських і службових будівлях, службово-побутових приміщеннях повинні бути захищені від перенавантажень. Захист від перенавантажень повинні мати електричні мережі промислових підприємств, мережі силових електроприймачів житлових, адміністративних та інших будівель лише в випадках, коли за умовами технологічного процесу чи режиму роботи в мережі може виникнути тривале перенавантаження проводів та кабелів.

В мережах, які захищаються від перенавантаження, плавкі вставки запобіжників чи вставки розподільників автоматів вибирають таким чином, щоб допустима величина навантаження на цей провід чи кабель складала не менше 125% максимального струму захищеного апарата.

3.1.3 Вибір плавких вставок запобіжників і переріз проводів та кабелів за умовами нагріву

Щоб захистити провід чи кабель від надмірного нагрівання необхідно перервати струм, що викликає це нагрівання. Розрив струму може бути

здійснений за допомогою запобіжника з плавкою вставкою. Розрізняють плавкі вставки двох типів:

- 1) з малою теплоємністю (швидкодіючі). До них відносяться плавкі вставки, що виготовляються з мідного дроту;
- 2) з великою теплоємністю (інертні), що виготовляються з металу з великим питомим опором, наприклад із свинцю чи його сплавів.

Інертні запобіжники можна використовувати в тих випадках, коли мережі споживають електроприймачі, які мають пускові струми чи короточасні перенавантаження. В цьому випадку недовготривалі за часом пускові струми не можуть перегріти проводи мережі, однак якщо плавка вставка не має інерції, то під дією пускового струму вона згорить і тим самим розірве коло.

Вибір запобіжників з плавкими вставками здійснюють таким чином: для проводів з навантаженням, при включенні якого виникають значні пускові струми (включення асинхронних короткозамкнутих двигунів і т. і.), струм плавкої вставки $I_{н.вст}$ вибирають відповідно до відношення

$$I_{н.вст} \geq \frac{I_{\max}}{\alpha}, \quad (3.9)$$

де $I_{\max}$ – найбільше значення струму в колі;

α – коефіцієнт, який залежить від теплової характеристики запобіжника і тривалості пуску

Під $I_{\max}$ розуміють:

- а) для відгалуження до одиничних електроприймачів пусковий струм чи найбільший струм навантаження;
- б) для кіл, що споживають n приймачів:

$$I_{\max} = m \sum I_{p(n-1)} + I_{пуск}, \quad (3.10)$$

де m – коефіцієнт одночасності;

$\sum I_{p(n-1)}$ – сума робочих струмів електроприймачів за винятком електроприймача, що має максимальний пусковий струм;

$I_{пуск}$ – максимальний пусковий струм електроприймача.

Для асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором приймають $\alpha = 2,5$. Для асинхронних електродвигунів з важкими умовами пуску $\alpha = (1,6 \div 2,0)$.

Порядок вибору плавких вставок для захисту проводів від дії СКЗ і перевантажень.

1. *Для мереж, що мають електроприймачі без пускових струмів.* Визначають розрахунковий струм $I_{розр}$. За ним підбирають найближчу стандартну плавку вставку з обов'язковою умовою

$$I_{н.вст} \geq I_{розр}. \quad (3.11)$$

У випадку необхідного захисту проводу від перевантажень за розрахунковим струмом вибирають струм плавкої вставки, а переріз проводу вибирають за допустимим струмом $I_{дон}$, який визначається з відношення

$$I_{дон} \geq 1,25 I_{н.вст}. \quad (3.12)$$

2. *Для мереж, що споживають електроприймачі з пусковими струмами.* Визначають розрахунковий струм $I_{розр}$. За ним підбирають найближчу стандартну плавку вставку з обов'язковою умовою (3.11), в якій розрахунковий струм приймають рівним

$$I_{розр} = \frac{I_{\max}}{\alpha}. \quad (3.13)$$

Перевіряють, чи захищає вибрана плавка вставка переріз проводів від дії СКЗ відповідно до нерівності:

$$\frac{I_{н.вст}}{I_{дон}} \leq 3, \quad (3.14)$$

де $I_{дон}$ — допустимий струм для даного перерізу проводів, що визначається за додатком Б.

Якщо нерівність не витримана, потрібно збільшити переріз до необхідного значення. При цьому струм плавкої вставки зберігається попереднім. Захист від перевантажень здійснюється так, як і для електроприймачів без пускових струмів.

3.2 Приклади розв'язування задач

- і** Розрахувати кабельну лінію трифазного змінного струму з напругою 380/220 В, що призначена для живлення силового розподільного щита будівництва житлового будинку. Розрахункове навантаження щита 78 кВт при $\cos\varphi = 0,75$, протяжністю лінії 110 м.
- № 3.1

Розв'язування

1. Розрахунковий струм навантаження:

$$I_{розр} = \frac{P_{розр}}{\sqrt{3}U \cos\varphi} = \frac{78000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,75} = 158 \text{ (А)}.$$

2. За таблицею допустимих струмових навантажень на кабелі з мідними жилами (див. додаток Б) вибираємо мідний кабель з перерізом 35 мм². Тривало допустимий струм для цього кабелю $I_{дон} = 175$ А. Оскільки $I_{дон} > I_{розр}$, то за умовою нагрівання кабель підходить.
3. З додатку В вибираємо опір кабельних ліній з напругою до 1 кВ: $r_0 = 0,514$ Ом/км; $x_0 = 0,35$ Ом/км. Перевіримо вибраний кабель на втрату напруги:

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{ном}} \cdot (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \cdot 100 = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 158 \cdot 0,110}{380} \cdot (0,514 \cdot \cos 0,75 + 0,35 \cdot \sin 0,75) \cdot 100 = 4,89 \text{ (\%)} \end{aligned}$$

Допустима втрата напруги в силових низьковольтних мережах $\Delta U_{дон} \leq 5\%$. В нашому випадку $\Delta U\% < \Delta U_{дон}$. Тому, за втратою напруги, вибраний переріз кабелю підходить.



№ 3.2

Від трансформаторної підстанції (ТП) з номінальною напругою на низькій стороні 380/220 В прокладена електрична мережа на будівельний майданчик (рис. 3.2). Електродвигуни, вказані на схемі і в табл. 3.1, – асинхронні з короткозамкненим ротором, а освітлювальне навантаження – симетричне.

Мережу передбачається виконати:

- 1) від шин ТП до щита РЩ-1 чотирижильним кабелем з мідними жилами, прокладеним по стіні;
- 2) від щита РЩ-1 до щита РЩ-2 проводом в газових трубах;
- 3) всі інші мережі – ізольованим проводом на роликах по стінах (відкрита проводка).

Навантаження освітлювальної лінії 1 складає 20 кВт, лінії 2 – 30 кВт.

Потрібно розставити і підібрати плавкі вставки запобіжників і вибрати необхідні перерізи проводів і кабелів.

При розрахунку необхідно врахувати, що електродвигун М1 може бути перевантаженим.

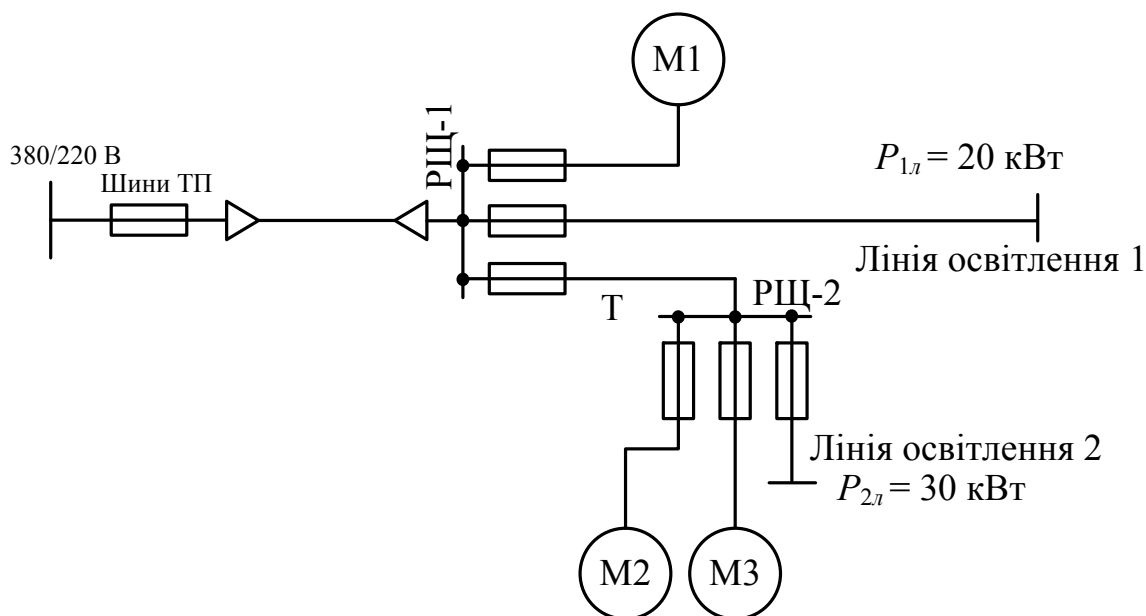


Рисунок 3.1 – Схема мережі до задачі 3.2

Таблиця 3.1 – Характеристика навантаження

Характер навантаження		Потужність $P_{ном}$, кВт	Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_{ном}$	Коефіцієнт корисної дії $\eta_{ном}$	Кратність пускового струму K_I	Коефіцієнт навантаження K_a	Довжина лінії L	Матеріал проводу	Спосіб прокладки
I	а) ТП-РЩ-1						100	Cu	Труба (земля)
	б) РЩ1-РЩ-2						70	Cu	Труба (земля)
II	а) РЩ-1-М1	7,0	0,87	0,86	6	1	30	Cu	Труба (земля)
	б) РЩ-1-Л1	20	1		10	0,7	50	Al	відкрито
III	а) РЩ-2-М2	14,0	0,89	0,9	6	0,8	20	Cu	Труба (земля)
	б) РЩ-2-М3	10	0,85	0,87	6	0,9	15	Cu	Труба (земля)
	в) РЩ-2-Л2	30	0,83		2,5	1	40	Al	відкрито

Розв'язування

I. Розподільний щит РЩ-1 – електродвигун М1.

1. Визначаємо параметри силового кола для живлення трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором – М1:

а) визначаємо розрахунковий струм

$$I_2 = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} = \frac{7,0}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,87 \cdot 0,86} = 14,23 \text{ (A)};$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1мм^2 поперечного перерізу проводу і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 1,5\text{ мм}^2$ та $I_{дон} = 27\text{ A}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad 27 > 14,23 - \text{умова виконується};$$

2) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U_{\%} \leq 5\%$:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{\text{ном}}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100,$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 14,23 \cdot 0,03 \cdot 100}{380} \cdot (15 \cdot 0,87 + 0,35 \cdot 0,49) = 2,56\%,$$

$$2,56 < 5\% - \text{умова виконується.}$$

Висновок: розрахунок силової електричної мережі від РЩ-1 до електродвигуна М1 виконано згідно з вимогами двох критеріїв – нагріву і спаду напруги, що дозволяє прокладку в трубах проводу марки ПРТО-1,5 мм²

2. Розрахунок силової електричної мережі живлення електродвигуна М1 від струмів короткого замикання:

а) для відгалужень з одиничним електроприймачем, при включенні якого виникають пускові струми, струм плавкової вставки запобіжника визначається з умови:

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{I_{\text{max}} \cdot K_a}{\alpha},$$

де I_{max} – максимальний струм:

$$I_{\text{max}} = K_I \cdot I_2 = 6 \cdot 14,23 = 85,4 \text{ (A)};$$

α – коефіцієнт, який залежить від теплової характеристики запобіжника і тривалості пуску (при різких і нетяжких пусах тривалістю 5-10 с $\alpha = 2,5$),

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{85,4 \cdot 1}{2,5} = 34,25 \text{ (A)};$$

б) із додатка Г вибираємо запобіжник типу НПН із стандартною плавкою вставкою 40 А;

в) перевіряємо вибрану вставку згідно з умовою

$$\frac{I_{\text{пл.вст}}}{I_{\text{доп}}} \leq 3, \quad \frac{40}{28} = 1,48 < 3 - \text{умова виконується.}$$

II. Розподільний щит РЩ-1 – лінія освітлення 1.

1. Для створення симетричного навантаження в освітлених лініях використовуються трифазні електричні мережі з нульовим проводом (чотирипровідні). Розрахунки в таких мережах проводяться аналогічно силовим мережам, відповідно:

а) визначаємо розрахунковий струм (для ламп розжарювання $\cos\varphi_{\text{ном}} = 1$):

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 1} = 30,24 \text{ (A)};$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1 мм^2 поперечного перерізу дроту і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 6 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 38 \text{ A}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р}}, \quad 38 > 30,42 \text{ A} - \text{умова виконується};$$

г) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U\% \leq 2,5\%$:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{\text{ном}}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100,$$

$$r_0 = 4,315 \text{ Ом}; x_0 = 0,3,$$

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 30,42 \cdot 0,05}{380} (4,315 \cdot 1 + 0,35 \cdot 0) \cdot 100 = 3 \text{ (\%)},$$

$$3\% > 2,5\% - \text{умова не виконується.}$$

д) вибираємо з додатка Б переріз проводу $S = 10 \text{ мм}^2$, тоді

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{ном}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100,$$

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 30,42 \cdot 0,05}{380} (2,95 \cdot 1 + 0,35 \cdot 0) \cdot 100 = 2,042 (\%),$$

2,042% < 2,5% – умова виконується.

Висновок: розрахунок електричної мережі для живлення освітлювальної лінії РЩ-1-Л1 відповідає вимогам двох критеріїв – нагріву і спаду напруги і дозволяє виконати прокладку фазних проводів марки АПВ- 10 мм² і нульового проводу АПВ-6 мм².

2. Розрахунок електричної мережі живлення РЩ1 – лінія 1 від струмів короткого замикання:

а) при включенні ламп розжарювання потужністю 500 Вт і більше виникають пускові струми. В цьому випадку

$$I_{п.вст} \geq \frac{I_{\max} \cdot K_a}{\alpha},$$

$$I_{\max} = K_I \cdot I_{1\bar{e}} = 10 \cdot 30,42 = 304,2 \text{ (A)};$$

$$I_{п.вст} = \frac{30,42 \cdot 0,7}{2,5} = 85,2 \text{ (A)};$$

б) з додатка Г вибираємо стандартну плавку вставку на 100 А;

в) перевіряємо вибрану вставку згідно з умовою

$$\frac{I_{п.вст}}{I_{доп}} \leq 3, \quad \frac{80}{30} = 2,67 < 3 \text{ умова виконується.}$$

III. Розподільний щит РЩ-2 – електродвигун М2.

1. Визначаємо параметри силового кола для живлення трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором – М2:

а) визначаємо розрахунковий струм

$$I_2 = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{14}{\sqrt{3}\cdot 0,38\cdot 0,89\cdot 0,9} = 25,6 \text{ (A)};$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1 мм^2 поперечного перерізу проводу і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 1,5 \text{ мм}^2$ та $I_{\text{доп}} = 27 \text{ A}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad 27 > 25,6 - \text{умова виконується.}$$

2. Перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U\% \leq 5\%$:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{\text{ном}}} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \cdot 100,$$

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 25,6 \cdot 0,02 \cdot 100}{380} \cdot (15 \cdot 0,89 + 0,35 \cdot 0,45) = 3,11\%,$$

$$3,11 < 5\% - \text{умова виконується.}$$

Висновок: розрахунок силової електричної мережі від РЩ-2 до електродвигуна М2 виконано згідно з вимогами двох критеріїв – нагріву і спаду напруги, що дозволяє прокладку в трубах проводу марки ПРТО-1,5 мм^2

IV. Розподільний щит РЩ-2 – електродвигун М3.

1. Визначаємо параметри силового кола для живлення трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором – М2:

а) визначаємо розрахунковий струм

$$I_3 = \frac{P_{3\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}\cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{10}{\sqrt{3}\cdot 0,38\cdot 0,85\cdot 0,87} = 20,57 \text{ (A)};$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1 мм^2 поперечного перерізу проводу і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 1,5 \text{ мм}^2$ та $I_{\text{доп}} = 27 \text{ A}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad 27 > 20,57 - \text{умова виконується.}$$

г) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U_{\%} \leq 5\%$:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{\text{ном}}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100,$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 20,57 \cdot 0,015 \cdot 100}{380} \cdot (15 \cdot 0,85 + 0,35 \cdot 0,53) = 1,81\%,$$

$$1,81 < 5\% - \text{умова виконується.}$$

Висновок: розрахунок силової електричної мережі від РЩ-2 до електродвигуна МЗ виконано згідно з вимогами двох критеріїв – нагріву і спаду напруги, що дозволяє прокладку в трубах проводу марки ПРТО-1,5 мм².

2. Розрахунок силової електричної мережі живлення електродвигуна МЗ від струмів короткого замикання:

а) для відгалужень з одиничним електроприймачем, при включенні якого виникають пускові струми, струм плавкової вставки запобіжника визначається із умови:

$$I_{\text{пл.вст}} \geq \frac{I_{\text{max}} \cdot K_a}{\alpha},$$

$$I_{\text{max}} = K_I \cdot I_3 = 6 \cdot 20,57 = 123,42 \text{ (A)};$$

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{123,42 \cdot 0,8}{2,5} = 39,5 \text{ (A)};$$

б) з додатка Г вибираємо стандартну плавку вставку запобіжника на 40 А;

в) перевіряємо вибрану вставку згідно з умовою

$$\frac{I_{\text{пл.вст}}}{I_{\text{доп}}} \leq 3, \quad \frac{40}{27} = 1,48 < 3 - \text{умова виконується.}$$

V. Розподільний щит РЩ-2 – лінія освітлення 2.

1. Для створення симетричного навантаження в освітлених лініях використовуються трифазні електричні мережі з нульовим проводом (чотирипровідні). Розрахунки в таких мережах проводяться аналогічно силовим мережам, відповідно:

а) визначаємо розрахунковий струм

$$I_{2.л} = \frac{P_{2.л}}{\sqrt{3}U_{ном} \cos \varphi_{ном}} = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,83} = 55 \text{ (A)};$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1 мм^2 поперечного перерізу проводу і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 10 \text{ мм}^2$ та $I_{дон} = 60 \text{ A}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву:

$$I_{дон} \geq I_p, \quad 60 > 55 - \text{умова виконується};$$

г) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U_{\%} \leq 2,5\%$:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{ном}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \cdot 100,$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 55 \cdot 0,04 \cdot 100}{380} \cdot (2,95 \cdot 0,83 + 0,35 \cdot 0,56) = 2,64\%,$$

$$2,64 > 2,5\% - \text{умова не виконується};$$

д) перераховуємо поперечний переріз проводу $S = 16 \text{ мм}^2$, тоді

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 55 \cdot 0,04 \cdot 100}{380} \cdot (1,84 \cdot 0,83 + 0,35 \cdot 0,56) = 1,72\%,$$

$$1,72 < 2,55\% - \text{умова виконується}.$$

Висновок: розрахунок електричної мережі для живлення освітлювальної лінії РЩ-2 – Л2 відповідає вимогам двох критеріїв – нагріву і спаду напруги і дозволяє виконати прокладку фазних проводів марки АПВ-10 мм^2 і нульового проводу АПВ-6 мм^2 ;

а) при включенні газорозрядних ламп високого тиску типу ДРЛ кратність пускового струму $K_I = 2,5$:

$$I_{\text{пл.вст}} \geq \frac{I_{\text{max}} \cdot K_a}{\alpha},$$

$$I_{\text{max}} = K_I \cdot I_3 = 2,5 \cdot 55 = 137,5 \text{ (A)};$$

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{137,5 \cdot 1}{2,5} = 55 \text{ (A)};$$

б) з додатка Г вибираємо запобіжник типу НПН із стандартною плавкою вставкою 60 А;

в) перевіряємо вибрану вставку згідно з умовою

$$\frac{I_{\text{пл.вст}}}{I_{\text{дон}}} \leq 3, \quad \frac{60}{67} = 0,9 < 3 \text{ — умова виконується.}$$

VI. Розподільний щит РЩ- 1 – РЩ-2.

1. Виконується розрахунок трифазної чотирипровідної мережі, виконаної в трубах мідними ізолюваними проводами:

а) визначаємо розрахунковий струм I_{1-2} , для цього розкладаємо струми I_2 , I_3 та $I_{2л}$ на активні і реактивні складові:

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = 25,6 \cdot 0,89 = 22,78 \text{ (A)},$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = 25,6 \cdot 0,45 = 11,52 \text{ (A)};$$

$$I_{3a} = I_3 \cos \varphi_3 = 20,57 \cdot 0,85 = 17,48 \text{ (A)},$$

$$I_{3p} = I_3 \sin \varphi_3 = 20,57 \cdot 0,53 = 10,83 \text{ (A)};$$

$$I_{л2a} = I_{л2} \cos \varphi = 55 \cdot 0,83 = 45,65 \text{ (A)},$$

$$I_{л2p} = I_{л2} \sin \varphi = 55 \cdot 0,56 = 30,68 \text{ (A)};$$

$$\begin{aligned} I_{1-2} &= \sqrt{(I_{2a} + I_{3a} + I_{л2a})^2 + (I_{2p} + I_{3p} + I_{л2p})^2} = \\ &= \sqrt{(22,78 + 17,48 + 45,65)^2 + (11,52 + 10,83 + 30,68)^2} = 101 \text{ (A)}. \end{aligned}$$

б) з додатка Б визначаємо допустимий струм навантаження на 1 мм^2 поперечного перерізу проводу і вибираємо згідно з розрахованим струмом $S = 25 \text{ мм}^2$ та $I_{\text{дон}} = 115 \text{ А}$;

в) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої температури нагріву:

$$I_{\text{дон}} \geq I_p, \quad 115 > 101 - \text{умова виконується};$$

г) перевіряємо вибраний переріз проводу за критерієм допустимої втрати напруги $\Delta U_{\%} \leq 2,5\%$:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{U_{\text{н}}} (r_0 \cos \varphi_{1-2} + x_0 \sin \varphi_{1-2}) \cdot 100,$$

$$f_{1-2} = \text{actg} \frac{I_{2p} + I_{3p} + I_{\text{л2p}}}{I_{2a} + I_{3a} + I_{\text{л2a}}} = \frac{11,52 + 10,83 + 30,68}{22,78 + 17,48 + 45,6} = 31,68^\circ,$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 101 \cdot 0,07 \cdot 104}{380} \cdot (0,72 \cdot 0,85 + 0,35 \cdot 0,52) = 2,5\%,$$

$$2,5 = 2,5\% - \text{умова виконується}.$$

Висновок: розрахунок трифазної чотирипровідної силової мережі РЩ-1 – РЩ-2 за критеріями нагріву і спаду напруги дозволяє виконати прокладку фазних проводів марки ПРТО-25 мм^2 і нульового проводу марки ПРТО-16 мм^2 .

3.3 Запитання для самоперевірки



1. За якими двома критеріями розраховують електричні лінії?
2. В чому полягає суть розрахунку перерізу проводів за умов нагріву?
3. Напишіть формулу для визначення втрати напруги в лінії однофазного змінного струму.
4. Напишіть формулу для визначення втрати напруги в лінії трифазного змінного струму.
5. За якою умовою вибирають струм плавкої вставки запобіжника для захисту від струмів перевантаження?

6. За якою умовою вибирають струм плавкої вставки запобіжника для захисту лінії від струмів короткого замикання?
7. В чому особливість захисту запобіжником з плавкими вставками асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором?
8. Накресліть і поясніть схеми електрозабезпечення підвищеної надійності.
9. Перерахуйте основні види понижувальних трансформаторних підстанцій.
10. Накресліть схему понижувальної трансформаторної підстанції 6/0,4 – 0,23 кВ і поясніть призначення всіх її елементів.
11. Перерахуйте основні способи підвищення коефіцієнта потужності електроустановки.
12. В чому полягає суть заземлення?

3.4 Контрольні задачі



Задача Е.1
(варіанти 1-10)

Розрахувати електричну лінію однофазного змінного струму для споживання групи ламп накаливання потужністю P при напрузі мережі живлення U і протяжності лінії L . Умови прокладання лінії і матеріал її проводів заданий в табл. 3.1. Вибрати запобіжники і струми плавких вставок для захисту лінії від струмів короткого замикання (СКЗ).

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до задачі Е.1

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P , кВт	2	3,5	1,9	2,0	1,4	1,5	2,0	2,5	3	1,2
U , В	220	220	127	127	127	127	220	220	220	220
Умови прокладання	T	0	T	0	T	0	T	0	T	0
Матеріал проводу	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu



Задача Е.2
(варіанти 11-20)

Розрахувати електричну лінію для споживання електродвигуна, тип якого вказаний в табл. 3.2. Напруга мережі живлення U . Проводку в трубах виконати ізольованими алюмінієвими проводами. Протяжність лінії 40 м. Вибрати запобіжники і струми плавких вставок для захисту двигунів від СКЗ.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до задачі Е.2

Варіант	Тип ел. двиг.	U , В	Варіант	Тип ел. двиг.	U , В
11	A2-61-2	220	16	A2-62-6	380
12	A2-61-4	380	17	A2-71-6	220
13	A2-61-4	220	18	A2-71-4	380
14	A2-62-2	380	19	A2-72-4	220
15	A2-62-4	220	20	A2-72-6	380



Задача Е.3
(варіанти 21-30)

Розрахувати переріз проводів і струми плавких вставок запобіжників електричної трифазної лінії. Дані для розрахунку наведені в табл. 3.3: напруга лінії U , розрахункова потужність P_p , коефіцієнт потужності $\cos\phi$, протяжність лінії L ; матеріал проводів –

Cu (мідь), Al (алюміній); тип проводки – П (проводами), К (кабелем); спосіб прокладання – О (відкрито), Т (в трубах), З (в землі); призначення лінії – осв. (освітлювальні приймачі), сил. (силові електроприймачі).

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до задачі Е.3

Величина	Варіант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U , В	220	380	380	2200	380	220	380	380	220	380
P_p , кВт	140	50	250	90	145	30	100	120	90	180
Матеріал проводу	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Cu	Al	Al	Cu
Тип проводу	П	К	К	П	К	П	К	П	К	К
Спосіб прокладання	О	З	З	Т	З	О	З	О	З	О
Призначення лінії	осв	сил	сил	осв	осв	сил	сил	осв	сил	сил
L , м	63	70	120	50	60	90	70	130	100	100
$\cos\varphi$	0,9	0,8	0,85	0,9	0,92	0,85	0,8	0,9	0,8	0,9

4 ЕЛЕКТРОНІКА

4.1 Електронні випрямлячі

Електронні випрямлячі (electronic rectifiers) – електронні пристрої, які перетворюють електричну енергію змінного струму в електричну енергію постійного струму [12]. Вони бувають: некерованими і керованими, одно- і багатофазними, за формою випрямленої напруги – одно- і двопівперіодні. В загальному випадку випрямлення здійснюється за схемою, поданою на рис. 4.1.

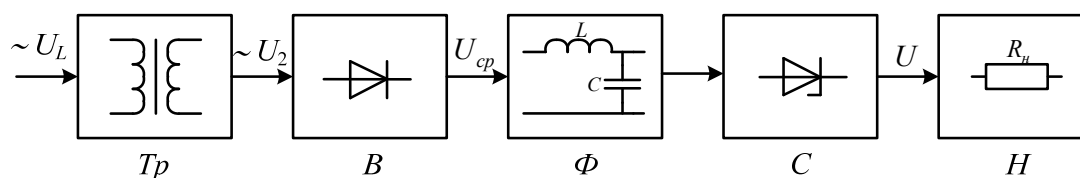


Рисунок 4.1 – Загальна схема випрямлення

На рис. 4.1: *Tr* – трансформатор, *B* – випрямляч, *Ф* – згладжувальний фільтр, *C* – стабілізатор, *H* – навантаження.

Трансформатор – забезпечує необхідний рівень напруги і гальванічно розв’язує навантаження від мережі змінного струму.

Випрямляч (rectifier) – являє собою напівпровідникові прилади (діоди або тиристори), які перетворюють змінний струм в постійний. В результаті на виході формується однополярна випрямлена напруга, миттєве значення якої змінюється в часі – пульсуюча напруга.

Згладжувальний фільтр (smoothing filter) – забезпечує зменшення пульсацій випрямленої напруги і струму до потрібної величини.

Стабілізатор (stabilizer) – забезпечує постійність випрямленої напруги і струму при зміні вхідної напруги U_L .

Трансформатор, згладжувальний фільтр і стабілізатор не є обов’язковими елементами випрямляча.

Основними параметрами, які характеризують роботу випрямляча є:

- середня випрямлена напруга (average rectified voltage) U_{cp} ;
- середній випрямлений струм (average rectified current) I_{cp} ;
- частота пульсацій (frequency of pulsation) $f = 1/T$;

- коефіцієнт пульсацій (pulsation factor) за першою гармонікою k_n ;
- коефіцієнт корисної дії η ;
- зовнішня характеристика (external characteristic) $U_{cp} = f(I_{cp})$ при $U_1 = \text{const}$ і $f = \text{const}$.

Випрямляючі діоди повинні відповідати таким експлуатаційним вимогам:

- максимальному середньому допустимому випрямленому струму (maximum average admissible rectified current) діода $I_{cp.\text{max}}$;
- зворотному допустимому значенню напруги (return value of tension), яка може бути прикладена до діода $U_{зв.\text{max}}$;
- зворотному струму (reverse current) діода $I_{зв.}$, обумовленому дією зворотної максимальної напруги $U_{зв.\text{max}}$;
- прямому спаду напруги (direct voltage drop) на діоді $U_{пр.}$, утвореній прямим струмом діода $I_{пр.}$.

Розрізняють некеровані і керовані випрямлячі.

Некеровані випрямлячі (uncontrollable rectifiers) створюють на навантаженні незмінну випрямлену напругу. Вони бувають: одно- і двопівперіодні, однофазні і багатофазні (трифазні), а також помножувачі напруги.

Керовані випрямлячі (controllable rectifiers) забезпечують плавне регулювання середнього значення випрямленої напруги, яка використовується для регулювання швидкості двигунів постійного струму, струму зарядження акумуляторів тощо [13-15].

4.1.1 Однофазні випрямлячі

За умови, якщо потужність споживача електричної енергії постійного струму не перевищує 2 кВт, доцільно використовувати однофазні випрямлячі, які живляться від однофазної мережі. Для випрямлення однофазної змінної напруги застосовують три типи випрямлячів: однопівперіодний і два двопівперіодних.

4.1.1.1 Однопівперіодна схема випрямлення

Схема однопівперіодного випрямлення наведена на рис. 4.2, а.

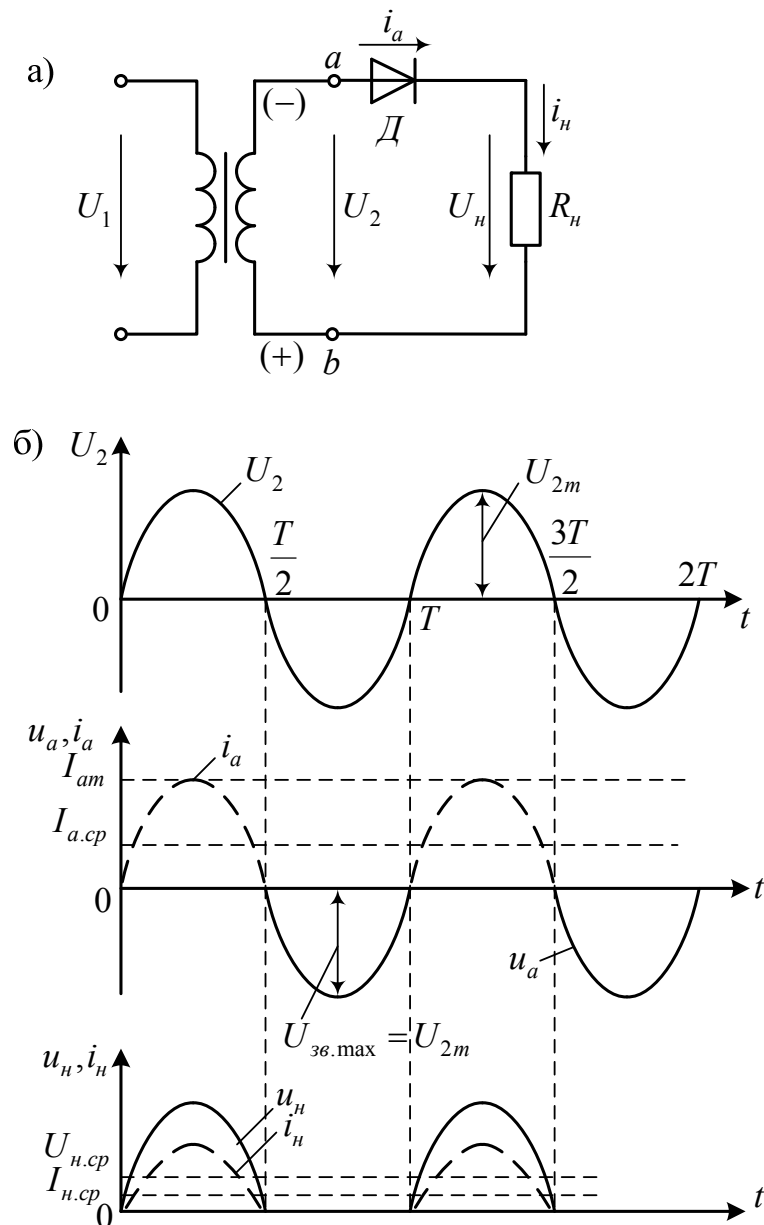


Рисунок 4.2 – Схема (а) та часова діаграма напруг і струмів (б) однопівперіодного випрямляча

Випрямляч складається із трансформатора, до вторинної обмотки якого послідовно підключений діод D і навантажувальний резистор R_n . Для спрощення аналізу роботи випрямлячів трансформатор і діод вважають ідеальними, приймаючи припущення: у трансформатора активний опір

обмоток, а у діода прямий опір рівні нулю; зворотний опір діода рівний нескінченності; в трансформаторі відсутні потоки розсіювання. При таких припущеннях з підключенням первинної обмотки трансформатора до мережі змінної синусоїдальної напруги у вторинній обмотці буде наводитись синусоїдальна ЕРС.

Роботу випрямляча зручно розглядати за допомогою часових діаграм (рис. 4.2, б). В перший півперіод, тобто на інтервалі часу $0 - T/2$, діод відкритий, оскільки потенціал точки a вищий потенціалу точки b , і під дією напруги в колі вторинної обмотки трансформатора виникає струм i_n . На інтервалі часу $T/2 - T$ діод закритий, струм в навантажувальному резисторі відсутній, а до закритого діода прикладається зворотна напруга u_2 . В однопівперіодному випрямлячі:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,45U_2, \quad (4.1)$$

або

$$U_2 = \frac{\pi U_{н.ср}}{\sqrt{2}} \approx 2,22U_{н.ср},$$

$$I_{н.ср} = 0,45 \frac{U_2}{R_n}.$$

Струм $I_{н.ср}$ є прямим струмом діода, тобто:

$$I_{пр.ср} = I_{н.ср} = 0,45 \frac{U_2}{R_n}. \quad (4.2)$$

Струм $I_{н.ср}$ є струмом вторинної обмотки трансформатора: $I_{н.ср} = I_2$. Тоді з врахуванням (4.1) дійсне значення цього струму:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_n} = \frac{\pi U_{н.ср}}{\sqrt{2}R_n} \approx 1,57I_{н.ср}. \quad (4.3)$$

При розрахунку типової потужності трансформатора можна вважати, що $S_1 \approx S_2$. Тоді

$$S_{тр} \approx S_2 \approx U_2 I_2 = 2,22U_{н.ср} \cdot 1,57I_{н.ср} \approx 3,5P_{н.ср}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт пульсацій $p = 1,57$. Це значення отримується розкладанням в ряд Фур'є вихідної напруги однопівперіодного випрямляча:

$$u_n = U_{н.ср} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (4.5)$$

Враховуючи те, що коефіцієнт пульсацій p є відношенням амплітуди основної (першої) гармоніки, частота якої в даному випадку дорівнює ω , до випрямленої напруги $U_{н.ср}$, отримаємо:

$$p = \frac{U_{н.ср} \frac{\pi}{2}}{U_{н.ср}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57.$$

Основною перевагою однопівперіодного випрямляча є його простота. Аналіз електричних параметрів дозволяє зробити висновок про недоліки цього випрямляча: великий коефіцієнт пульсацій, мале значення випрямленого струму і напруги.

Однопівперіодні випрямлячі зазвичай застосовують для живлення високоомних навантажувальних пристроїв (наприклад, електронно-променевих трубок), які допускають підвищену пульсацію, потужність не більше 10 – 15 Вт.

Діоди в випрямлячах є основним елементом. Тому вони повинні відповідати основним електричним параметрам випрямлячів. Інакше кажучи, діоди визначають основні показники випрямлячів.

Діоди характеризуються рядом основних параметрів. Для того, щоб випрямляч мав високий коефіцієнт корисної дії, спад напруги на діоді U_{np} при прямому струмі I_{np} повинен бути мінімальним. В паспорті на діод вказують середнє значення прямого струму $I_{np.ср}$, яке чисельно дорівнює середньому значенню випрямленого струму $I_{н.ср}$, і середнє значення прямого спаду напруги $U_{np.ср}$.

Пороговий електричний режим діода характеризується такими параметрами:

- максимальною зворотною напругою $U_{зв.мах}$;
- максимальним прямим струмом $I_{np.мах}$, який відповідає $I_{винр.мах}$.

Потрібно також враховувати максимальну частоту діодів $f_{мах}$. У випадку перевищення цієї частоти діоди втрачають вентильні

характеристики. Для надійної роботи діодів у випрямлячах необхідне дотримання умов:

$$\begin{cases} I_{np.cp} > I_{н.ср}, \\ U_{зв.мах} > \sqrt{2}U_{2m} \end{cases} \quad (4.6)$$

з перевищенням приблизно на 30 %.

4.1.1.2 Двопівперіодна (мостова) схема випрямлення

Найбільше розповсюдження отримав двопівперіодний мостовий випрямляч (рис. 4.3, а). Він складається із трансформатора і чотирьох діодів, підключених до вторинної обмотки трансформатора за мостовою схемою. До однієї із діагоналей мосту підключається вторинна обмотка трансформатора, а до другої – навантажувальний резистор R_n . Кожна пара діодів (D_1, D_3 , і D_2, D_4) працює по чергові.

Діоди D_1 і D_3 відкриті в перший півперіод напруги вторинної обмотки трансформатора u_2 (інтервал часу $0 - T/2$), коли потенціал точки a вищий потенціалу точки b . При цьому в навантажувальному резисторі R_n з'являється струм i_n (рис. 4.3, б). На цьому інтервалі діоди D_2 і D_4 закриті.

В наступний півперіод напруги вторинної обмотки (інтервал часу $T/2 - T$) потенціал точки b вищий потенціалу точки a , діоди D_2 і D_4 відкриті, а діоди D_1 і D_3 – закриті. В обидва півперіоди, як видно із рис. 4.3, струм через навантажувальний резистор R_n має один і той же напрям.

Аналіз часових діаграм дозволяє отримати вирази для середніх значень випрямленої напруги і струму:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2, \quad (4.7)$$

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx 0,9 \frac{U_2}{R_n}. \quad (4.8)$$

Відомі значення напруги вторинної обмотки трансформатора:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{н.ср} \approx 1,11 U_{н.ср}. \quad (4.9)$$

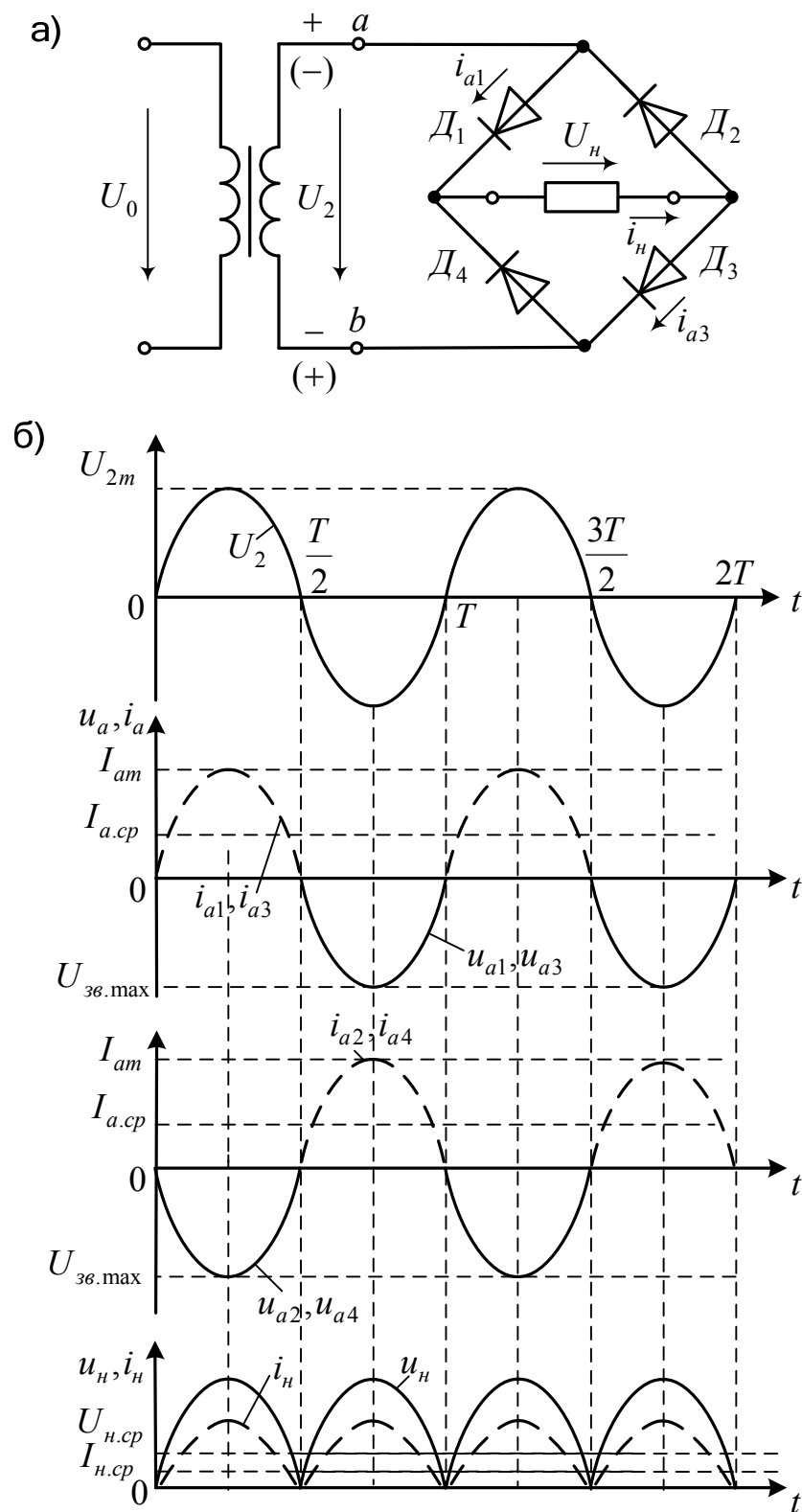


Рисунок 4.3 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) мостового випрямляча

Оскільки середній струм кожного діода є також струмом вторинної обмотки трансформатора, то

$$I_{np.cp} = I_{2cp} = 0,5I_{н.ср}, \quad (4.10)$$

а максимальний струм вторинної обмотки

$$I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_i}, \quad (4.11)$$

то діюче значення струму вторинної обмотки можна знайти як

$$I_2 = \frac{\pi U_{н.ср}}{2 \cdot 2R_n} \approx 0,78I_{н.ср}. \quad (4.12)$$

З часових діаграм видно, що максимальна зворотна напруга на діодах:

$$U_{зв. \max} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_{н.ср} \approx 1,57U_{н.ср}. \quad (4.13)$$

Максимальний прямиий струм діода:

$$I_{np. \max} = \frac{U_{2m}}{R_n} = \frac{\pi}{2} \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx 1,57I_{н.ср}. \quad (4.14)$$

Аналіз наведених співвідношень показує, що при однакових значеннях параметрів трансформаторів і опору R_n , мостовий випрямляч в порівнянні з однопівперіодним має такі переваги: середнє значення випрямленого струму $I_{н.ср}$ і напруги $U_{н.ср}$ в два рази більше, а пульсації значно менші.

Розклавши напругу u_n (рис. 4.3, б) в ряд Фур'є, отримаємо числове значення коефіцієнта пульсацій:

$$u_n = U_{н.ср} \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right). \quad (4.15)$$

Амплітуда основної гармоніки із частотою 2ω дорівнює $2/3$. Отже, $p \approx 0,67$.

З іншої сторони максимальна зворотна напруга на кожному із закритих діодів, які відносно затискачів вторинної обмотки ввімкнені паралельно, має таке ж значення, що і в однопівперіодному випрямлячі, тобто

$U_{2m} = \sqrt{2}U_2$. Всі ці переваги досягнуті за рахунок збільшення кількості діодів в чотири рази, що є основним недоліком мостового випрямляча.

4.1.1.3 Двопівперіодний випрямляч з виведенням середньої точки вторинної обмотки трансформатора

Двопівперіодний випрямляч з виведенням середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рис. 4.4, а) можна розглядати як сукупність двох однопівперіодних випрямлячів, ввімкнених на один і той же навантажувальний резистор R_n .

Дійсно, в кожний із півперіодів напруги u_{ab} працює або верхня, або нижня частина випрямляча. Коли потенціал точки a вищий потенціалу середньої точки O (інтервал часу $0 - T/2$), діод D_1 відкритий, діод D_2 закритий, оскільки потенціал точки b нижчий потенціалу точки O . В цей період часу на навантажувальному резисторі R_n з'являється струм i_n (рис. 4, б). В наступний півперіод напруги u_{ab} (інтервал часу $T/2 - T$) потенціал точки b вищий, а потенціал точки a нижчий потенціалу точки O . Діод D_2 відкритий, а діод D_1 закритий. При цьому струм в навантажувальному резисторі R_n має той же напрямок, що і в попередній півперіод. При однакових значеннях напруги U_{2a} і U_{2b} ці струми будуть рівними.

Даний тип випрямляча має такі ж переваги перед однопівперіодним випрямлячем, що й мостовий випрямляч, за винятком напруги $U_{зв. max}$, яка визначається напругою u_{ab} . При $U_{ab} = 2U_2$ і однакових значеннях опорів навантажувальних резисторів R_n :

$$U_{зв. max} = \pi U_{н.ср} \approx 3,14 U_{н.ср}. \quad (4.16)$$

Вирази для середніх значень випрямленої напруги і струму:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2. \quad (4.17)$$

$$I_{н.ср} = \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx 0,9 \frac{U_2}{R_n}. \quad (4.18)$$

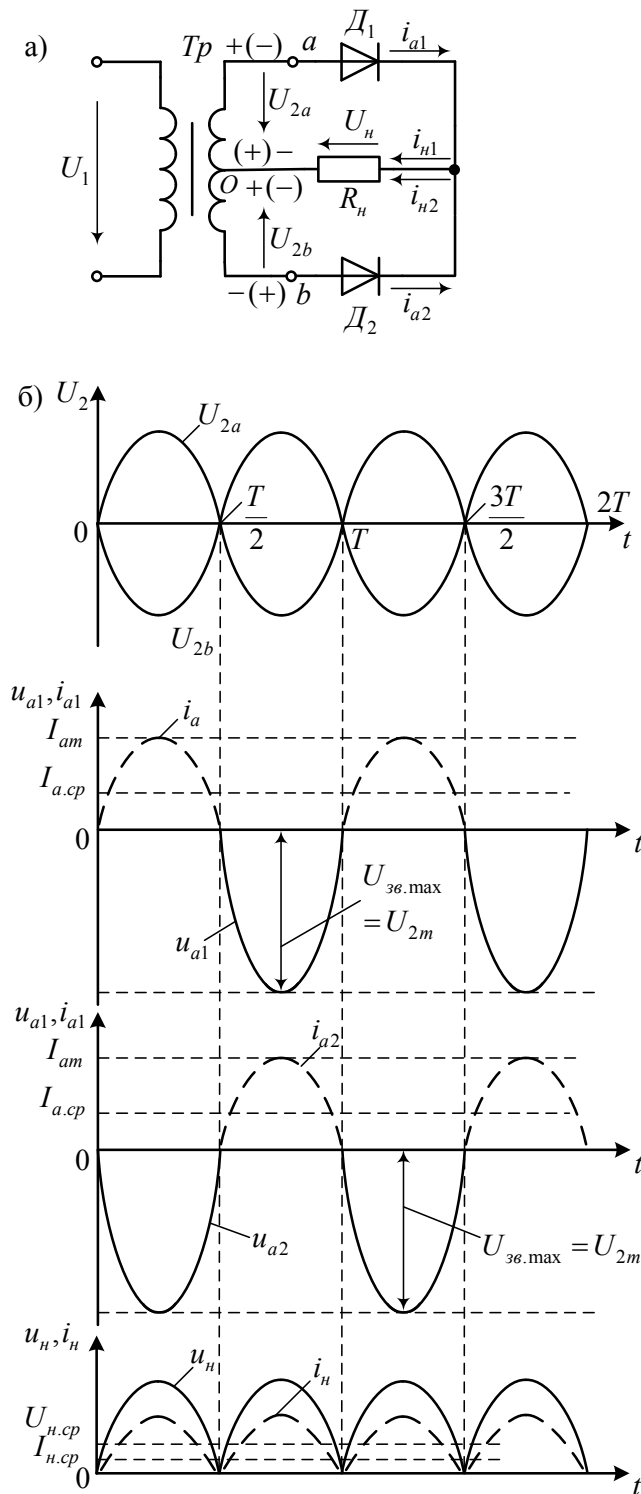


Рисунок 4.4 – Схема (а) і часові діаграми напруг і струмів (б) двопівперіодного випрямляча з виведенням середньої точки вторинної обмотки трансформатора

Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{н.ср} \approx 1,11 U_{н.ср}. \quad (4.19)$$

Максимальний прямий струм діода:

$$I_{пр.мах} = \frac{U_{2m}}{R_n} = \frac{\pi}{2} \frac{U_{н.ср}}{R_n} \approx 1,57 I_{н.ср}. \quad (4.20)$$

Коефіцієнт пульсацій $p \approx 0,67$.

Крім вказаного недоліку в двопівперіодному випрямлячі габарити, маса і вартість трансформатора більші, ніж в однопівперіодному і мостовому випрямлячах, оскільки вторинна обмотка має вдвічі більше число витків і потребує виведення із середньої точки обмотки.

Відмітимо, що переваги цього випрямляча досягаються при двічі меншій кількості діодів. Двопівперіодні випрямлячі застосовують для живлення навантажувальних пристроїв малої та середньої потужності.

4.1.2 Згладжувальний фільтр

Згладжувальним фільтром називають пристрій, призначений для зменшення пульсацій випрямленої напруги. Випрямлена напруга є пульсуючою, в якій можна виділити постійну і змінну складову. Коефіцієнти пульсацій мають такі значення:

- для однопівперіодного однофазного випрямляча – 1, 57;
- для двопівперіодного однофазного випрямляча – 0,67.

З такими коефіцієнтами пульсацій випрямлену напругу в подальшому використовувати не можна, оскільки робота електронних блоків і приладів різко погіршиться або взагалі недопустима. В залежності від того чи іншого електронного блока (підсилювача, генератора, і т. і.), його місця в електронному приладі чи системі (на вході, виході і т. і.) коефіцієнт пульсацій напруги живлення не повинен перевищувати конкретних значень. Наприклад, для основних каскадів автоматичних систем він не повинен перевищувати $10^{-2} \div 10^{-3}$, для вихідних підсилювальних каскадів – $10^{-4} \div 10^{-5}$, для автогенераторів – $10^{-5} \div 10^{-6}$, а для вихідних каскадів електронних вимірювальних приладів – $10^{-6} \div 10^{-7}$. Згладжувальні фільтри встановлюють між випрямлячем і стабілізатором постійної напруги з навантаженням R_n (див. рис. 4.1).

Основними елементами згладжувальних фільтрів є конденсатори, котушки індуктивності і транзистори, опір яких різний для постійного і змінного струмів. Для постійного струму опір конденсатора дорівнює нескінченності, а опір котушки індуктивності дуже малий. Опір постійного струму (статичний опір) на два-три порядки менший опору змінного струму (динамічний опір). Основним параметром, який характеризує ефективність фільтра, є *коефіцієнт згладжування*, рівний відношенню коефіцієнтів пульсацій на вході і виході фільтра:

$$q = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}}. \quad (4.21)$$

Крім дотримання вимог до коефіцієнта згладжування, фільтри повинні мати мінімальний спад напруги на елементах, мінімальні габарити, масу і вартість. В залежності від типу фільтруючого елемента, розрізняють *ємнісні, індуктивні і електронні фільтри*. За кількістю фільтруючих рівнів фільтри поділяються на *одноланкові і багатоланкові*.

4.1.2.1 Ємнісні фільтри

Даний тип фільтрів відноситься до одноланкових фільтрів. Ємнісний фільтр включають паралельно до навантажувального резистора R_n (рис. 4.5, а).

Роботу ємнісного фільтра зручно розглядати за допомогою часових діаграм, зображених на рис. 4.5, б. На інтервалі часу $t_1 - t_2$ конденсатор через відкритий діод D заряджається до амплітудного значення напруги u_2 , оскільки в цей період напруга $u_2 > u_C$. В цей час струм $i_a = i_C + i_n$. На інтервалі часу $t_2 - t_3$, коли напруга u_2 стає меншою напруги на конденсаторі u_C , конденсатор розряджається на навантажувальний резистор R_n , заповнюючи розрядним струмом паузу в навантажувальному струмі i_n , яка присутня в однопівперіодних випрямлячах при відсутності фільтра. В даний момент часу напруга на резисторі R_n знижується до деякого значення, яке відповідає часу t_3 , при якому напруга u_2 в позитивний півперіод стає рівною напрузі на конденсаторі u_C . Після цього діод знову відкривається, конденсатор C_ϕ починає заряджатися, і процеси зарядки і розрядки конденсатора повторюються.

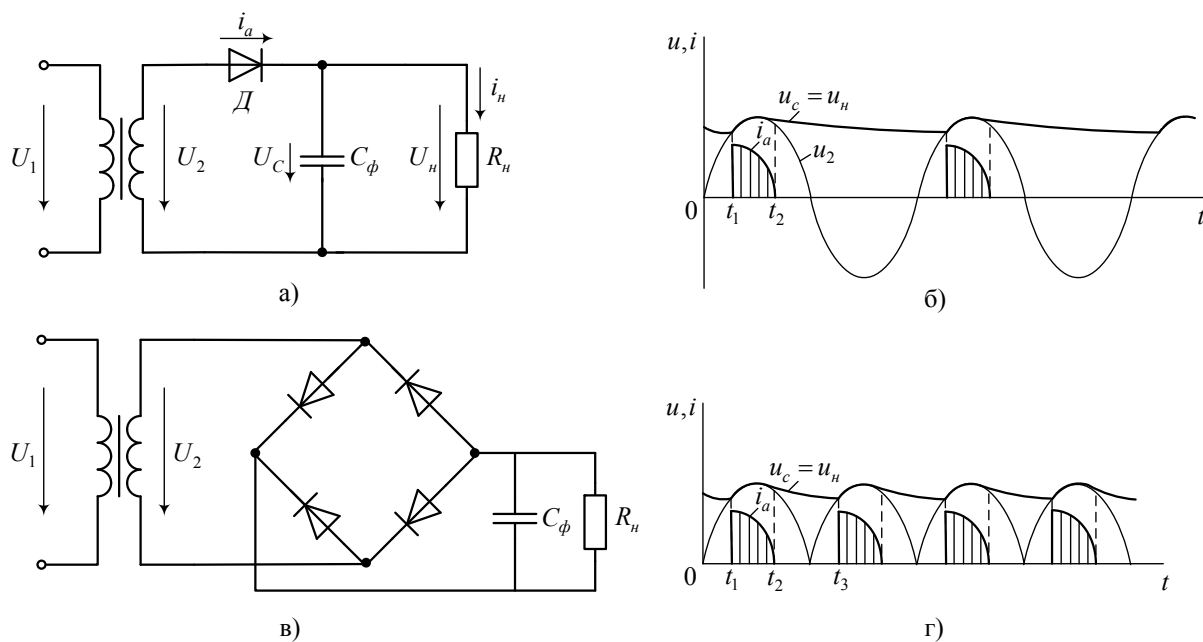


Рисунок 4.5 – Схеми ємнісних фільтрів з однопівперіодним (а) і мостовим (в) випрямлячами, часові діаграми напруг і струмів однопівперіодного (б) і мостового (г) випрямлячів з ємнісним фільтром

Часові діаграми струму і напруг двопівперіодного мостового випрямляча з ємнісним фільтром (рис. 4.5, в) наведені на рис. 4.5, г. Аналіз часових діаграм показує, що при зміні ємності конденсатора C_ϕ або опору навантажувального резистора R_n буде змінюватись значення коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги. При цьому чим менше розрядиться конденсатор, тим меншими будуть пульсації у випрямленому струмі i_n . Розряд конденсатора C_ϕ визначається постійною часу розрядки $\tau_{розр} = C_\phi R_n$. При постійній часу $\tau_{розр} \geq 10T$ коефіцієнт пульсацій визначається за формулою:

$$p = \frac{1}{2\pi f_{осн} \tau_{осн}}, \quad (4.22)$$

де $f_{осн}$ – частота основної гармоніки, яка не перевищує 10^{-2} Гц.

Робота випрямляча з ємнісним фільтром суттєво залежить від зміни навантажувального струму. Дійсно, при збільшенні струму i_n , що відбувається при зменшенні опору R_n , постійна часу $\tau_{розр}$ зменшується. Зменшується і середнє значення випрямленої напруги $U_{н,ср}$, а пульсації збільшуються.

При використанні ємнісного фільтра слід враховувати, що максимальне значення струму діода i_a визначається тільки опором діода R_{np} і вторинною обмоткою трансформатора, тому він може досягати значень, більших $I_{np.max}$. Такий великий струм може вивести з ладу діод. Для запобігання цьому послідовно з діодом необхідно включати додатковий резистор. Крім цього, потрібно враховувати, що напруга $U_{зв.max}$, яка прикладена до діода, вдвічі перевищує U_{2m} , оскільки в момент часу, коли діод закритий, напруга на конденсаторі і вторинній обмотці трансформатора додаються.

4.1.2.2 Г-подібні фільтри

Г-подібні фільтри є найпростішими багатоланковими фільтрами. Цей фільтр може бути LC -типу (рис. 4.6, а) і RC -типу (рис. 4.6, б). Їх застосовують тоді, коли за допомогою одноланкових фільтрів не виконуються вимоги, які на них накладаються, з точки зору отримання необхідних коефіцієнтів згладжування. Ці фільтри є більш складним в порівнянні з одноланковими, забезпечують значно більше зменшення коефіцієнта пульсацій.

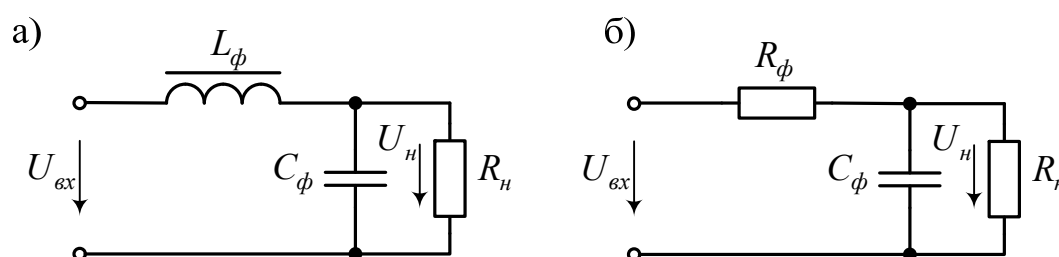


Рисунок 4.6 – Схеми Г-подібних LC -фільтра (а) і RC -фільтра (б)

Зниження пульсацій LC -фільтром пояснюється спільними діями котушки індуктивності і конденсатора. Зниження змінних складових випрямленої напруги обумовлено як згладжуваною дією конденсатора C_ϕ , так і значним спадом змінних складових напруги на дроселі L_ϕ . В той же час постійна складова напруги на навантажувальному резисторі не зменшується, оскільки відсутній значний спад напруги цієї складової на дуже малому активному опорі дроселя. З врахуванням рекомендацій щодо вибору значень C_ϕ і L_ϕ , вирази для коефіцієнта згладжування LC -фільтра можна записати у вигляді:

$$q = \omega_{осн}^2 L_\phi C_\phi - 1. \quad (4.23)$$

Даний вираз дозволяє розрахувати параметри даного фільтра за заданим значенням коефіцієнта згладжування:

$$L_{\phi} C_{\phi} = \frac{q+1}{\omega_{осн}^2}. \quad (4.24)$$

В малопотужних випрямлячів, у яких опір навантажувального резистора складає декілька кілоом, замість дроселя L_{ϕ} включають резистор R_{ϕ} (рис. 46, б), що суттєво зменшує масу, габарити і вартість фільтра. При виборі C_{ϕ} і R_{ϕ} на резисторі R_{ϕ} створюється значно більший спад напруги від змінних складових випрямленого струму, ніж на резисторі R_n . Якщо вибрати значення R_{ϕ} із співвідношення:

$$R_n / (R_n + R_{\phi}) = 0,5 \div 0,9,$$

то спад постійної складової напруги на резисторі R_{ϕ} буде мінімальним. А як наслідок – частка змінної складової у випрямленій напруги відносно постійної складової на навантажувальному резисторі R_{ϕ} значно зменшиться. Коефіцієнт згладжування для Г-подібного RC-фільтра визначається з виразу:

$$q = (0,5 \div 0,9) \omega_{осн} R_{\phi} C_{\phi}. \quad (4.25)$$

Слід відмітити, що коефіцієнт згладжування RC-фільтра менший ніж у LC-фільтра.

4.1.2.3 П-подібні фільтри

П-подібний фільтр відносить до багатоланкових фільтрів, оскільки складається із ємнісного фільтра $C_{\phi 1}$ і Г-подібного LC-фільтра $L_{\phi} C_{\phi 2}$ або RC-фільтра $R_{\phi} C_{\phi 2}$ (рис. 4.7, а, б).

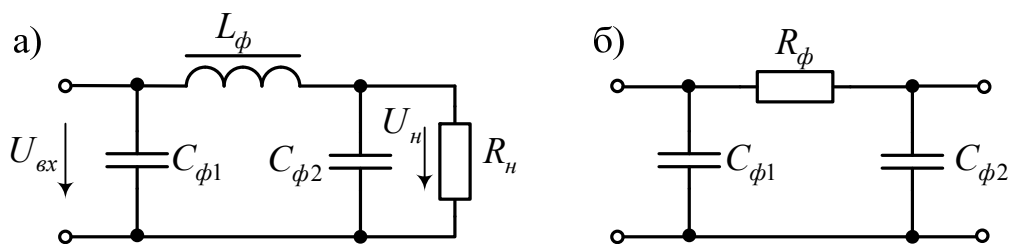


Рисунок 4.7 – Схеми П-подібних: LC-фільтра (а) і RC-фільтра (б)

Коефіцієнт згладжування багатоланкових фільтрів дорівнює (при дотриманні конкретних вимог) добутку коефіцієнтів складових ланок (фільтрів). Тому коефіцієнт згладжування П-подібного фільтра:

$$q_{\Pi} = q_C q_{\Gamma}, \quad (4.26)$$

де q_C , q_{Γ} – коефіцієнти згладжування С-фільтра і Г-подібного фільтра.

При опорах навантажувального пристрою в декілька кілоом застосовують П-подібні CRC-фільтри, а при малих опорах (декілька Ом) – CLC-фільтри. Невеликий коефіцієнт згладжування П-подібного фільтра досягається при умові $C_{\phi 1} = C_{\phi 2}$. П-подібні фільтри доцільно використовувати, коли коефіцієнт згладжування повинен бути рівним $10^2 - 10^3$ і більшим. Більший коефіцієнт згладжування П-подібного фільтра в порівнянні з Г-подібним досягається за рахунок погіршення таких параметрів випрямляча, як габарити, маса і вартість.

4.2 Підсилювачі на біполярних транзисторах

4.2.1 Загальні відомості

Підсилювачі є одним з найбільш поширених електронних пристроїв, застосовуваних в системах автоматики та радіосистемах. Підсилювачі поділяються на *попередні підсилювачі (підсилювачі напруги)* та *підсилювачі потужності*. Попередні транзисторні підсилювачі, як і лампові, складаються з одного чи декількох каскадів підсилення. При цьому всім каскадам підсилювача притаманні спільні якості, різниця між ними може бути лише кількісна: різні струми, напруги, значення резисторів, конденсаторів тощо.

Для каскадів попереднього підсилювача найбільш розповсюджені резистивні схеми (з реостатно-ємнісним зв'язком). В залежності від способу подачі вхідного сигналу та отримання вихідного підсилювальні схеми отримали такі назви:

- 1) зі спільним емітером СЕ (рис. 4.8);
- 2) зі спільною базою СБ (рис. 4.9);
- 3) зі спільним колектором (еміторний повторювач) – СК (рис. 4.10).

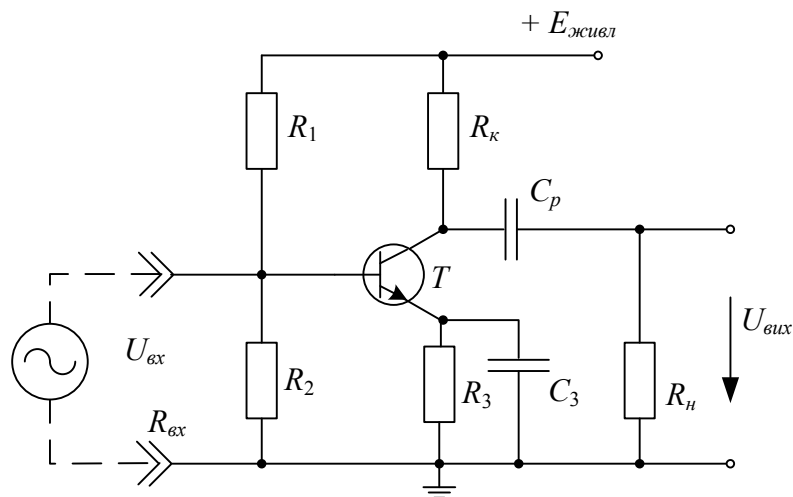


Рисунок 4.8 – Підсилювач зі спільним емітером

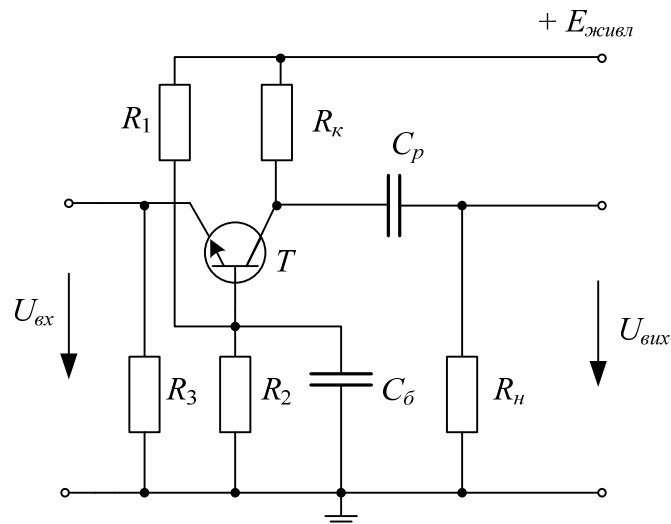


Рисунок 4.9 – Підсилювач зі спільною базою

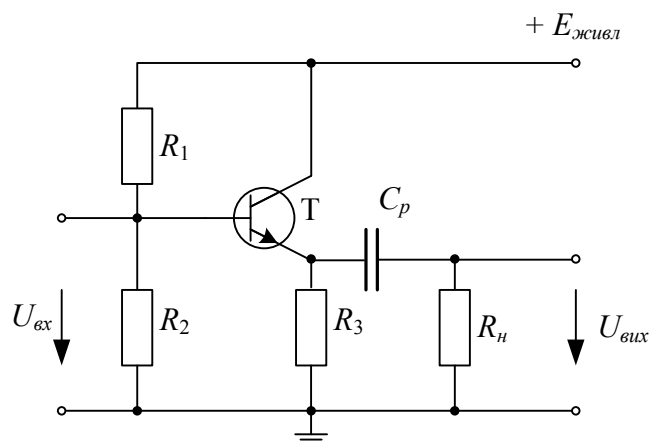


Рисунок 4.10 – Підсилювач зі спільним колектором

Найбільш розповсюдженою є схема з СЕ. Схема з СБ в попередніх підсилювачах зустрічається рідко. Емітерний повторювач має найбільший з усіх трьох схем вхідний і найменший вихідний опори, тому його застосовують при роботі з високоомними перетвореннями як перший каскад підсилювача, а також для узгодження з низькоомним навантажувальним резистором.

В табл. 4.1 наводиться зіставлення різних схем включення транзисторів.

Таблиця 4.1 – Параметри схем включення транзисторів

Параметри	Схема включення		
	Зі спільною базою	Зі спільним емітером	Зі спільним колектором
Коефіцієнт підсилення за напругою	30-400	30-1000	≈ 1
Коефіцієнт підсилення струму	≈ 1	10-200	10-200
Коефіцієнт підсилення за потужністю	30-400	3000-30 000	10-200
Вхідний опір	50-100 Ом	200-2000 Ом	10-500 кОм
Вихідний опір	0,1-0,5 мОм	30-70 кОм	50-100 Ом

Розглянемо підсилювальний каскад з СЕ. При розрахунку каскаду підсилювача в основному відомо:

1) R_n – опір навантаження, на яке повинен працювати каскад, який розраховується; навантаженням може бути й аналогічний каскад;

2) $U_{нт}$ або $I_{нт}$ – необхідне значення амплітуди напруги навантаження або сили струму;

3) допустимі частотні відхилення;

4) діапазон робочих температур;

5) напруга джерела живлення колекторного кола в більшості випадків задана.

В результаті розрахунку необхідно визначити:

1) тип транзистора;

2) режим роботи обраного транзистора;

3) параметри каскаду;

4) значення всіх елементів кола (резистори, конденсатори), їх параметри та типи.

4.2.2 Розрахунок каскаду підсилювача напруги низької частоти з реостатно-смісним зв'язком

Послідовність розрахунку наводиться для транзистора, включеного за схемою з СЕ (рис. 4.8).

Вхідні дані:

- 1) напруга на виході каскаду $U_{вих.мах}$ (напруга на навантаженні);
- 2) опір навантаження R_n ;
- 3) нижня гранична частота f_n ;
- 4) допустиме значення коефіцієнта частотних відхилень каскаду в області нижніх частот M_n ;
- 5) напруга джерела живлення $E_{живл.}$.

Припущення:

- каскад працює в стаціонарних умовах ($T_{min} = 15^0 \text{ C}$; $T_{max} = 25^0 \text{ C}$);
- вплив температури на режим транзистора достатньо малий.

Визначити:

- 1) тип транзистора;
- 2) режим роботи транзистора;
- 3) опір колекторного навантаження R_k ;
- 4) опір в колі емітера R_e ;
- 5) опори ділянки напруги R_1 та R_2 , що стабілізують режим роботи транзистора;
- 6) ємність розподільного конденсатора C_p ;
- 7) ємність конденсатора в колі емітера C_e ;
- 8) коефіцієнт підсилення каскаду за напругою.

Порядок розрахунку

1. Обираємо тип транзистора, керуючись такими міркуваннями:

а) найбільша допустима напруга між колектором та емітером (наводиться в довідниках) повинна знаходитися в межах

$$U_{ке доп} \geq (1,1 \div 1,3)E_{живл.} ; \quad (4.27)$$

б) найбільший допустимий струм колектора (наводиться в довідниках):

$$I_{\text{кдоп}} > 2I_{\text{нт}} = \frac{2U_{\text{вих.т}}}{R_{\text{н}}}, \quad (4.28)$$

де $I_{\text{нт}}$ – найбільша можлива амплітуда струму навантаження;

Рекомендації:

а) заданий діапазон температур задовольняє будь-який транзистор;
 б) для обраного типу транзистора виписати з довідника значення коефіцієнтів підсилення за струмом для СЕ β_{min} та β_{max} (або $h_{21\text{max}}$ та $h_{21\text{min}}$). В деяких довідниках дається коефіцієнт підсилення α за струмом для схеми СБ та початковий струм колектора $I_{\text{кн}}$. Тоді

$$\beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}. \quad (4.29)$$

При виборі режиму роботи транзистора необхідно виконати умову $I_{\text{к min}} \geq I_{\text{кн}}$;

в) для каскадів підсилювачів напруги звичайно застосовують малопотужні транзистори типу ГТ-108, ГТ-109, МП-20, МП-21, МП-25, МП-40, МП-41, МП-42, МП111, МП113 та інші. Вибір конкретного типу транзистора за довідковою літературою [16 – 19].

2. Режим роботи транзистора визначаємо за навантажувальною прямою, побудованою на сім'ї вхідних статичних (колекторних) характеристик для СЕ. Побудова навантажувальної прямої показано на рис. 4.11.

Навантажувальна пряма будується за двома точками: 0 – точка спокою (робоча) і 1, яка визначається значенням напруги джерела живлення $E_{\text{живл.}}$. Координатами 0, є струм спокою $I_{\text{к0}}$ та напруга спокою $U_{\text{ке0}}$ (тобто струм та напруга, що відповідають $U_{\text{вх}} = 0$).

Можна прийняти

$$I_{\text{к0}} = (1,05 \div 1,2)I_{\text{вих}} \approx (1,05 \div 1,2)I_{\text{нт}}. \quad (4.30)$$

$$U_{\text{ке0}} = U_{\text{вих.т}} + \Delta U_{\text{ке}} = U_{\text{кт}} + \Delta U_{\text{ке}}, \quad (4.31)$$

де $\Delta U_{\text{ке}}$ – напруга на колекторі, яка відповідає області нелінійних початкових ділянок вихідних характеристик транзистора.

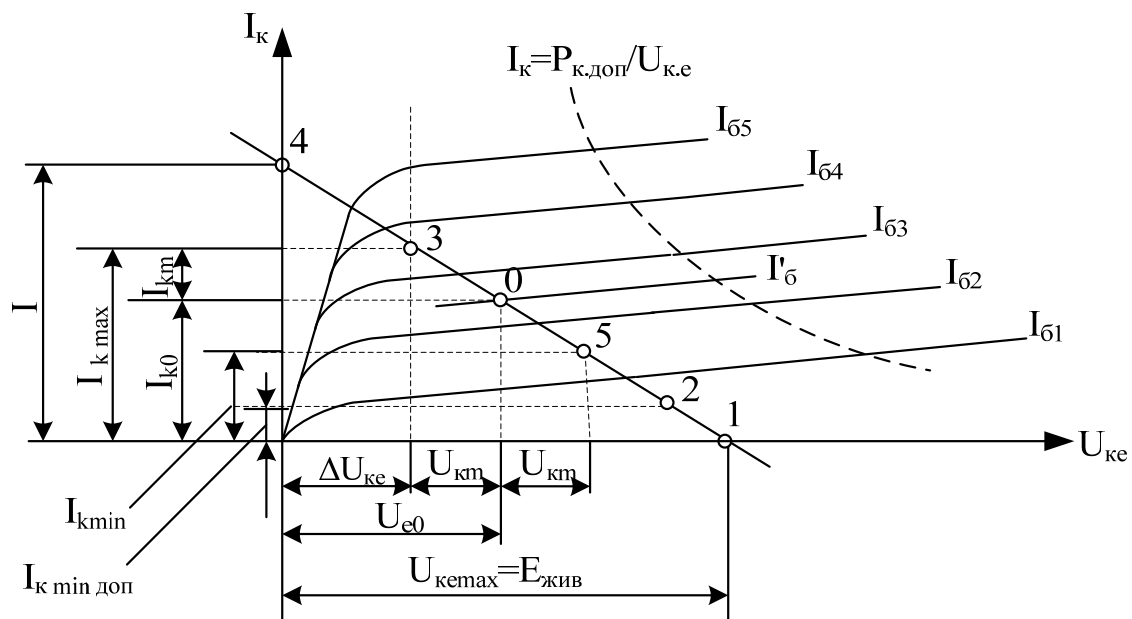


Рисунок 4.11 – Побудова навантажувальної прямої

Для малопотужних транзисторів можна прийняти $\Delta U_{ке} = 0,5 \div 1,0$ В.

3. Визначаємо значення опорів R_k та R_e . За вихідними характеристиками (рис. 4.11) визначаємо

$$R_{заг} = R_k + R_e. \quad (4.32)$$

Загальний опір в колі емітер-колектор:

$$R_{заг} = \frac{E_{жив.}}{I}, \quad (4.33)$$

де I – струм, який визначається точкою 4, тобто точкою перетину навантажувальної прямої з віссю струмів.

Приймається $R_e = (0,15 \div 0,25)R_k$. Розраховується

$$R_k = \frac{R_{заг}}{(0,15 \div 1,25)}. \quad (4.34)$$

4. Визначаємо найбільше амплітудне значення вхідного сигналу струму $I_{вх.м}$ та напруги $U_{вх.м}$. Задавшись найменшим значенням коефіцієнта підсилення транзистору за струмом β_{min} , отримаємо

$$I_{ex.m} = I_{\delta m} = \frac{I_{km}}{\beta_{min}}. \quad (4.35)$$

Причому струм $I_{ex.m}$ не повинен перевищувати значення

$$I_{ex.m} \leq \frac{I_{\delta.max} - I_{\delta.min}}{2}, \quad (4.36)$$

де для малопотужних транзисторів $I_{\delta.max} \approx 1 \div 2$ мА, $I_{\delta.min} \approx 0,05$ мА.

За вхідною статичною характеристикою для схем СЕ (рис. 4.12) та знайденими значеннями $I_{\delta.min}$ й $I_{\delta.max}$ знаходять значення $2U_{ex.m}$.

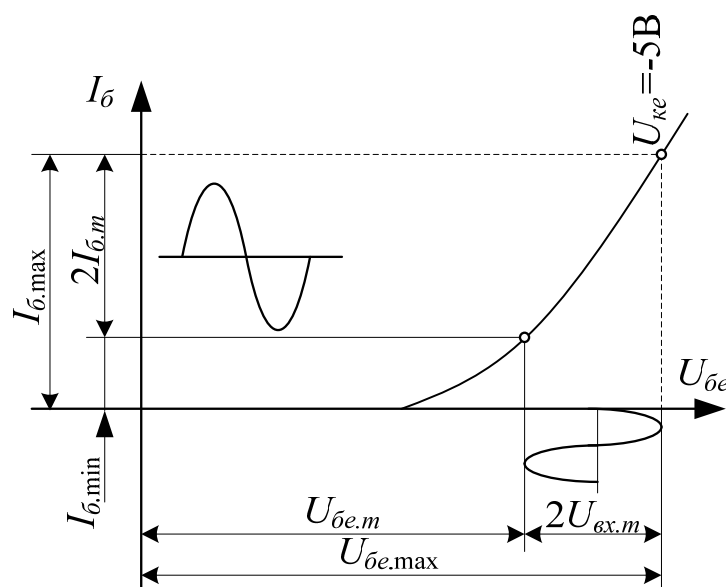


Рисунок 4.12 – Вхідна статична характеристика для схем СЕ

5. Визначаємо вхідний опір R_{ex} каскаду змінного струму (без врахування R_1 та R_2):

$$R_{ex} = \frac{2U_{ex.m}}{I_{ex.m}} \approx \frac{2U_{ex.m}}{2I_{\delta m}}. \quad (4.37)$$

6. Розраховуємо опори ділянки R_1 та R_2 . Для зменшення шунтувальної дії ділянки на вхідне коло каскаду за змінним струмом приймають

$$R_{1-2} \geq (8 \div 12)R_{ex}, \quad (4.38)$$

$$R_{1-2} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}. \quad (4.39)$$

Тоді

$$R_1 = \frac{E_{жув} R_{1-2}}{R_e I_e} = \frac{E_{жув} R_{1-2}}{R_e I_{K0}}, \quad (4.40)$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_{1-2}}{(R_1 - R_{1-2})}. \quad (4.41)$$

7. Коефіцієнт нестабільності роботи каскаду

$$S = \frac{R_e (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_e (R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{1 + \beta_{\max}}}, \quad (4.42)$$

де $\beta_{\max}$ – найбільший можливий коефіцієнт підсилення струму обраного типу транзистора.

Для нормальної роботи каскаду коефіцієнт нестабільності не повинен перевищувати декілька одиниць.

8. Визначаємо ємність розподільного конденсатора C_p та вихідний опір $R_{вих}$:

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H R_{вих} \sqrt{M_H^2 - 1}}, \quad (4.43)$$

$$R_{вих} = \frac{R_{вих.T} R_K}{(R_{вих.T} + R_K)} + R_H, \quad (4.44)$$

де $R_{вих.T}$ – вихідний опір транзистора, який визначається за вхідними статичними характеристиками для схеми СЕ.

В більшості випадків $R_{вих.T} \gg R_K$, тому можна прийняти

$$R_{вих} \approx R_K + R_H. \quad (4.45)$$

9. Знаходимо ємність конденсатора

$$C_e \geq \frac{10}{2\pi f_H R_e}. \quad (4.46)$$

10. Розраховуємо коефіцієнт підсилення каскаду за напругою:

$$K_u = \frac{U_{вих.м.}}{U_{вх.м.}}. \quad (4.47)$$

Зауваження. Наведений порядок розрахунку не враховує вимог на стабільність роботи каскаду.

При аналізі транзисторних підсилювачів широке застосування отримали h -параметри. Електричний стан транзистора, включеного за схемою з спільним емітером, характеризується чотирма величинами: I_{δ} , $U_{\delta e}$, I_K , та U_{Ke} . З практичних міркувань зручно обирати як незалежні значення U_{Ke} та I_{δ} , тоді :

$$U_{\delta e} = f_1(I_{\delta}, U_{Ke}) \quad (4.48)$$

та

$$I_K = f_2(I_{\delta}, U_{Ke}). \quad (4.49)$$

В підсилювальних схемах входними та вихідними сигналами є приріст входних і вихідних напруг та струмів.

В межах лінійної частини характеристик для перетворень $\Delta U_{\delta e}$ та ΔI_K справедливі рівності:

$$\Delta U_{\delta e} = h_{11}\Delta I_{\delta} + h_{21}\Delta U_{Ke}, \quad (4.50)$$

$$\Delta I_K = h_{21}\Delta I_{\delta} + h_{22}\Delta U_{Ke}, \quad (4.51)$$

де h – параметри – відповідні частинні похідні, які легко можна отримати із сім'ї входних та вихідних характеристик транзистора, включеного за схемою СЕ:

$$\begin{array}{ll} h_{11} = \Delta U_{\delta e} \div \Delta I_{\delta} & U_{Ke} = \text{const}(\Delta U_{Ke} = 0); \\ h_{12} = \Delta U_{\delta e} \div \Delta U_{Ke} & I_{\delta} = \text{const}(\Delta I_{\delta} = 0); \\ h_{21} = \Delta I_K \div \Delta I_{\delta} & U_{Ke} = \text{const}(\Delta U_{Ke} = 0); \\ h_{22} = \Delta I_K \div \Delta U_{Ke} & I_{\delta} = \text{const}(\Delta I_{\delta} = 0). \end{array} \quad \text{при} \quad (4.52)$$

Значення h_{11} являє собою входний опір транзистора. Безрозмірна величина h_{12} є коефіцієнтом оберненого зв'язку за напругою. Як показує

аналіз схем на транзисторах, значення $h_{12} = 0,002 \div 0,0002$, тому при практичних розрахунках його можна прирівняти до нуля; h_{21} – безрозмірний коефіцієнт передачі за струмом, характеризує підсилювальні властивості (за струмом) транзистора при постійній напрузі на колекторі; h_{22} – характеризує вхідну провідність транзистора при постійному струмі бази.

h -параметри добре описують роботу транзистора в області низьких та середніх частот.

Відповідно до рівнянь (4.52) на рис. 4.13 зображена схема заміщення транзистора для змінних складових струмів і напруг при $h_{12} = 0$.

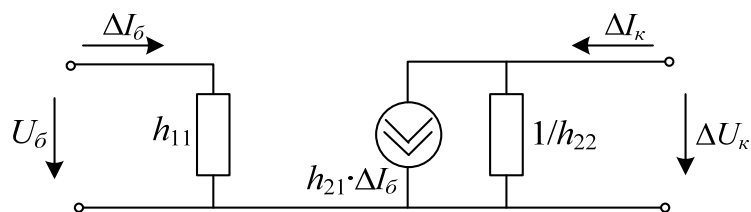


Рисунок 4.13 – Схема заміщення транзистора для змінних складових струмів і напруг при $h_{12} = 0$

Для розрахунку параметрів підсилювача необхідно визначити h -параметри робочої точки із сім'ї відповідних характеристик. При цьому коефіцієнт підсилення за напругою в режимі холостого ходу:

$$K_{U_x} = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_K}{1 + h_{22} R_K} \approx \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K. \quad (4.53)$$

При навантаженні

$$K_U = K_{U_x} \frac{R_H}{R_H + R_K}. \quad (4.54)$$

Вхідний опір підсилювача $R_{вх} \approx h_{11}$, а вихідний опір – $R_{вх} \approx R_K$.

4.3 Приклад розв'язування задачі



Розрахувати каскад транзисторного підсилювача напруги для схеми зі спільним емітером (рис. 4.8), для якої вихідна напруга

№ 4.1 $U_{вих.мах} = 4 \text{ В}; R_H = 500 \text{ Ом}; f_H = 100 \text{ Гц}; M_H = 1,2; E_{живл} = 12 \text{ В}.$

Розв'язування

1. Параметри транзистора:

$$U_{ке.дон} \geq E_{жив.} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ (В)},$$

$$I_{к.дон} > 2I_{нт} = \frac{U_{вих.мах}}{R_H} = 2 \cdot \frac{4}{500} = 0,016 \text{ А} = 16 \text{ (мА)}.$$

Обираємо транзистор МП42А, для якого $I_{к.дон} = 30 \text{ мА}; U_{ке.дон} = 15 \text{ В}; \beta_{\min} = 30; \beta_{\max} = 50; I_{к.мин.дон} = 25 \text{ мкА}.$

2. Для побудови навантажувальної прямої знаходимо (робочу) точку спокою (0). Для цього визначаємо

$$I_{K0} = 1,2I_{Hm} = 1,2 \cdot 8 = 9,6 \text{ (мА)};$$

$$U_{Ke0} = U_{вих.мах} + \Delta U_{Ke} = 4 + 1 = 5 \text{ (В)}.$$

Друга точка навантажувальної прямої $U_{ке} = E_{живл} = 12 \text{ В}.$ За отриманим значенням будується навантажувальна пряма.

3. За статичними вихідними характеристиками і навантажувальною прямою знаходимо $I = 18 \text{ мА},$ звідки:

$$R_{заг} = \frac{12}{18 \cdot 10^{-3}} = 670 \text{ (Ом)}.$$

Тоді

$$R_e = R_{заг} - R_k = 670 - 560 = 110 \text{ (Ом)}.$$

4. Найменший коефіцієнт підсилення за струмом (для схеми СЕ) для транзистора МП42А $\beta_{\min} = 30.$ Тоді $I_{вх.мин} = I_{б.мин} = I_{к.мин}.$ Оскільки маємо мале значення $I_{к.мин},$ можна прийняти $I_{к.мин} \approx 0,$ а тому $I_{б.мин} \approx 0.$

Амплітуда струму бази:

$$I_{б.мах} = \frac{I_{Km}}{\beta_{\min}} = \frac{14}{30} = 0,47 \text{ (мА)}.$$

Амплітуда вхідного струму:

$$I_{\text{ex.max}} = \frac{I_{\text{с. max}} - I_{\text{с. min}}}{2} = \frac{0,47 - 0}{2} = 0,235 \text{ (мА)}.$$

З вхідної статичної характеристики (для схеми СЕ) $U_{\text{сe.min}} = 0,11 \text{ В}$;
 $U_{\text{сe.max}} = 0,33 \text{ В}$,

$$2U_{\text{сx.m}} = U_{\text{сe.max}} - U_{\text{сe.min}} = 0,33 - 0,11 = 0,22 \text{ (В)}.$$

5. Знаходимо вхідний опір транзистора змінного струму:

$$R_{\text{сx}} = \frac{2U_{\text{сx.m}}}{2I_{\text{с.max}}} = \frac{0,22}{0,47 \cdot 10^{-3}} = 470 \text{ (Ом)}.$$

6. Для визначення R_1 та R_2 знаходимо

$$R_{1-2} \geq 8R_{\text{сx}} = 8 \cdot 470 \approx 3800 \text{ (Ом)},$$

звідки

$$R_1 = \frac{E_{\text{п}} R_{1-2}}{R_{\text{е}} I_{\text{К0}}} = \frac{12 \cdot 3800}{110 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} = 43000 \text{ (Ом)},$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_{1-2}}{(R_1 - R_{1-2})} = \frac{43000 \cdot 3800}{43000 - 3800} = 4200 \text{ (Ом)}.$$

7. Визначаємо, чи буде схема достатньо стабільна:

$$S = \frac{R_{\text{д}}(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_{\text{д}}(R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{(1 + \beta_{\text{max}})}} = \frac{110(43000 + 4200) + 43000 \cdot 4200}{110(43000 + 4200) + \frac{43000 \cdot 4200}{1 + 50}} \approx 2,66.$$

Отже, робота розрахованого каскаду достатньо стабільна.

8. Визначаємо ємність

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H \cdot (R_K + R_H) \cdot \sqrt{M_H^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot (560 + 500) \cdot \sqrt{1,2^2 - 1}} = 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}.$$

Приймаємо $C_p = 3 \text{ мкФ}$.

9. Знаходимо ємність

$$C_e \geq \frac{10}{2\pi f_H R_e} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 110} = 159 \cdot 10^{-6} (\Phi) = 159 (\text{мкФ}).$$

Для повного усунення від'ємного зворотного зв'язку необхідно включити $C_e \geq 159$ мкФ. Ця ємність занадто велика. Зазвичай використовують $C_e = (10 \div 30)$ мкФ. Приймаємо $C_e = 20$ мкФ.

10. Коефіцієнт підсилення каскаду за напругою:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих. max}}}{U_{\text{вх. м}}} = \frac{4}{0,11} = 36,4.$$

4.4 Запитання для самоперевірки



1. Принцип дії електронно-променевих трубок. Призначення трубок та їх маркування.
2. Розповісти про проходження електричного струму через простір, заповнений розрідженим газом.
3. Форми (види) газового розряду.
4. Внутрішньоатомна будова чистого напівпровідника.
5. Як впливають домішки на провідність напівпровідника?
6. Електронна (типу n) провідність напівпровідника.
7. Діркова (типу p) провідність напівпровідника.
8. Процес проходження струму через електронно-дірковий перехід.
9. Принцип дії та властивості точкових та площинних діодів.
10. Польові транзистори, тиристори. Їх характеристики.
11. Принцип дії та робота напівпровідникового тріода.
12. Коефіцієнт підсилення за струмом, напругою. Які їх значення для транзисторів, включених за схемами СБ, СЕ, СК?
13. Основні схеми випрямлення змінного струму.
14. За якими ознаками класифікуються підсилювачі низької частоти та їх особливості?
15. Як визначається коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду?
16. В яких випадках використовують багатокаскадні підсилювачі?
17. Яким чином здійснюється зв'язок між каскадами в багатокаскадному підсилювачі?
18. Що таке амплітудно-частотна характеристика підсилювача?

19. Що таке фазо-частотна характеристика підсилювача?
20. Чим визначається максимальне значення коефіцієнта підсилення підсилювача?
21. Що таке зворотний зв'язок в підсилювачах? Які існують види зворотного зв'язку?
22. Як змінюється коефіцієнт підсилення із збільшенням глибини від'ємного зворотного зв'язку?
23. При яких умовах відбувається перехід підсилювача в режим самозбудження?
24. Як впливає від'ємний зворотний зв'язок на стабільність роботи підсилювача?
25. Принципова відмінність підсилювача за потужністю від підсилювача за напругою.
26. Принцип роботи підсилювача напруги RC-типу. Призначення елементів схеми.
27. Принцип дії підсилювача напруги на біполярному транзисторі, включеному за схемою зі спільним емітером.
28. Які характеристики є вхідними, а які вихідними для включення транзистора за схемою з СЕ?
29. Що таке h - параметри транзистора та як вони визначаються?
30. Як обирають робочу точку транзистора?
31. Чому для підсилювача з СК коефіцієнт підсилення за напругою менший одиниці?
32. У чому перевага підсилювача, включеного за схемою зі СК перед іншими схемами підсилювачів?
33. За рахунок чого досягається підсилення потужності в схемах з транзистором?
34. Накреслити схему та пояснити принцип роботи генератора з автотрансформаторним (індуктивним) зворотним зв'язком.
35. Порівняти RC- генератори, та LC-генератори.
36. Принцип роботи імпульсних пристроїв.
37. Чим обумовлена необхідність переходу на інтегральні схеми?

4.5 Контрольні задачі



Задача ОЕ.1
(варіанти 0-25)

Розрахувати каскад транзисторного підсилювача напруги, принципова схема якого зображена на рис.4.8 та визначити h -параметри обраного типу транзистора. Дані для розрахунку наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до задачі ОЕ.1

Вар.	Дані для розрахунку				
	$U_{вих\ t},$ В	$R_n,$ Ом	$f_n,$ Гц	$E_{живл.},$ В	M_n
0	3,0	600	100	12	1,20
1	2,0	400	90	16	1,20
2	1,0	250	120	9	1,25
3	5,0	450	200	27	1,30
4	8,0	350	150	12	1,30
5	2,4	600	180	3	1,25
6	3,4	550	140	12	1,25
7	1,6	280	160	6	1,20
8	4,0	590	170	17	1,20
9	2,2	440	110	9	1,40
10	3,4	600	150	12	1,40

Продовження табл. 4.1

Вар.	Дані для розрахунку				
	$U_{вих\ m},$ В	$R_n,$ Ом	$f_n,$ Гц	$E_{живл.},$ В	M_n
11	1,5	200	60	3	1,30
12	1,7	250	70	6	1,30
13	1,8	300	80	9	1,30
14	2,0	350	90	12	1,20
15	2,1	400	120	15	1,20
16	2,3	450	140	18	1,20
17	2,5	480	150	24	1,40
18	2,7	500	160	27	1,40
19	2,8	520	170	24	1,40
20	3,0	540	180	20	1,35
21	3,1	550	200	18	1,35
22	3,2	580	220	15	1,25
23	3,5	560	230	12	1,25
24	3,6	480	250	9	1,20
25	1,8	320	270	6	1,30



Задача ОЕ.2
(варіанти 1-10)

Випрямляч, працюючи без фільтра від мережі напругою U_1 через узгоджувальний трансформатор, має коефіцієнт пульсації напруги k_n , середню випрямлену напругу холостого ходу $U_{cp.o.}$, середній номінальний струм навантаження $I_{cp.o.}$. На виході випрямляча ввімкнено індуктивний фільтр, який має коефіцієнт згладжування q . Частота струму основної гармоніки випрямленої напруги f . Накреслити схему випрямляча з індуктивним фільтром і узгоджувальним трансформатором, активний опір вторинної обмотки якого R_{mp} . Визначити максимальну зворотну напругу, максимальний струм діодів, діючу напругу вторинної обмотки трансформатора та вибрати діоди й вказати їх параметри (додаток Д, табл. Д.1). Побудувати зовнішню характеристику випрямляча, якщо середній

прямий опір діодів $R_{\text{дн}}$, і визначити номінальну напругу. Розрахувати величину індуктивності фільтра та коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора.

Дані для розрахунку наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані до задачі ОЕ.2

Вар.	Дані для розрахунку							
	U_1 , В	k_n	$U_{\text{ср.о.}}$, В	$I_{\text{ср.о.}}$, А	q	f , Гц	$R_{\text{мп}}$, Ом	$R_{\text{дн}}$, Ом
1	220	1,57	10,0	1,0	2,5	50	1,0	0,3
2	380	0,67	11,5	2,5	3,5	60	1,7	0,2
3	127	0,25	12,5	1,5	4,5	400	1,9	0,5
4	135	1,57	12,0	2,7	2,3	100	1,3	0,4
5	240	0,67	14,5	1,9	3,2	60	1,6	0,5
6	400	0,057	13,5	1,2	4,3	100	2,0	0,6
7	155	0,25	15,0	0,8	2,2	50	1,1	0,4
8	200	1,57	22,0	1,3	3,8	400	1,2	0,2
9	140	0,25	18,0	1,4	2,6	100	1,5	0,3
10	230	0,057	17,0	0,6	5,5	50	1,8	0,7

Примітка. При розв'язанні цієї задачі потрібно за заданим коефіцієнтом пульсації визначити схему випрямляча: однофазна однопівперіодна, однофазна мостова, трифазна однопівперіодна чи трифазна мостова [20]. В [20] наведені необхідні для розрахунку формули. Для розрахунку індуктивного фільтра можна використати [20].



Задача ОЕ.3
(варіанти 1-10)

Однокаскадний підсилювач на транзисторі КТ312В, виконаний за схемою зі спільним емітером (рис. 4.14), має робочу точку на середині вихідних статичних характеристик транзистора (додаток Е, рис. Е.1). Визначити величину опору резистора R_6 в колі бази; коефіцієнти підсилення за напругою K_U , струмом K_I , потужністю K_P ; ємності C_1 , C_2 розділювальних конденсаторів; ємність C_E конденсатора в колі емітера

при заданих ЕРС джерела живлення E_K , опорах навантаження R_H і кола колектора R_K , внутрішньому опорі джерела сигналу R_{BT} , граничній нижній частоті підсилення f_n , допустимому коефіцієнті спотворення M .

Дані для розрахунку наведені в табл. 4.3.

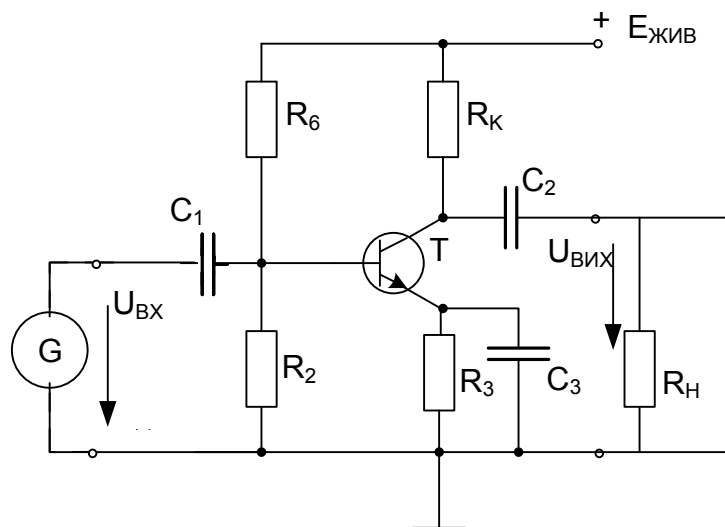


Рисунок 4.14 – Схема однокаскадного підсилювача на транзисторі до задачі ОЕ.3

Таблиця 4.3 – Вихідні дані до задачі ОЕ.3

Вар	Дані для розрахунку					
	E_K , В	R_H , кОм	R_K , кОм	R_{BT} , кОм	f , Гц	M
1	15	1,3	0,90	0,82	60	1,10
2	20	1,0	1,00	0,90	50	1,15
3	16	1,5	1,10	1,10	75	1,20
4	18	1,1	0,80	1,20	40	1,25
5	22	1,2	1,20	0,85	80	1,30
6	24	1,6	0,70	0,95	65	1,22
7	25	1,7	0,91	0,87	85	1,18
8	23	1,4	0,85	1,15	90	1,23
9	19	1,8	0,75	1,05	55	1,17
10	17	0,9	0,95	0,88	95	1,13

Примітка. При розв'язанні цієї задачі потрібно скористатися спрощеними схемами заміщення однокаскадного підсилювача [21]. Для визначення координат робочих точок підсилювача потрібно нанести на вихідні статичні характеристики лінію навантаження, яку можна побудувати за двома точками: точка А при $I_K = 0$; точка В при $U_{KE} = 0$, а потім за допомогою вхідних статичних характеристик визначити струм спокою бази. Це дає можливість розрахувати опір в колі бази R_{BT} .

Решту розрахунків виконують відносно спрощеної схеми заміщення.



Задача ОЕ.4
(варіанти 1-10)

Розрахувати величини опорів резисторів R_{OC} , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 та вихідну напругу інвертуючого суматора (рис. 4.15), виконаного на заданому операційному підсилювачі, якщо вихідна напруга змінюється за законом

$$U_{ВИХ} = -(\kappa_1 U_{ВХ1} + \kappa_2 U_{ВХ2} + \kappa_3 U_{ВХ3}),$$

де κ_1 , κ_2 , κ_3 – коефіцієнти підсилення для вхідних напруг $U_{ВХ1}$, $U_{ВХ2}$, $U_{ВХ3}$.

Дані для розрахунку наведені в табл. 4.4.

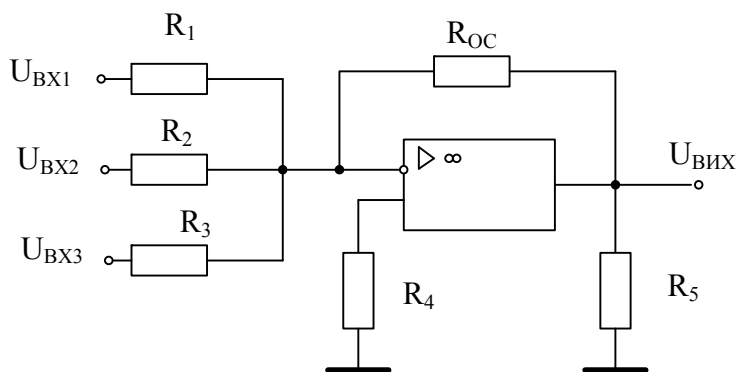


Рисунок 4.15 – Схема інвертуючого суматора до задачі ОЕ.4

Примітка. При розв'язанні задачі потрібно опори R_1 , R_2 , R_3 вибрати із співвідношення $R_1, R_2, R_3 \ll R_{ВХ}$, тобто менші вхідного опору операційного підсилювача, а $R_5 > R_{н\text{н}}$, тобто більші вихідного опору операційного підсилювача (додаток Д, табл. Д.2). Розрахунок величин резисторів можна провести, користуючись викладеним в [20].

Таблиця 4.4 – Вихідні дані до задачі ОЕ.4

Вар .	Дані для розрахунку						
	Тип операційного підсилювача	κ_1	κ_2	κ_3	$U_{BX1},$ В	$U_{BX2},$ В	$U_{BX3},$ В
1	К140УД6	10	0,50	4,2	-0,10	2,3	-0,40
2	К140УД7	20	0,40	1,7	0,20	-1,2	0,32
3	К140УД8	30	0,55	3,6	-0,15	1,9	-0,36
4	К140УД10	14	0,80	2,2	0,20	-3,1	0,47
5	К153УД3	24	0,35	2,8	0,22	-2,4	-0,50
6	КМ551УД1	18	0,70	4,1	-0,18	1,6	0,34
7	К544УД1	28	0,75	3,1	0,30	2,7	-0,38
8	К140УД10	25	0,30	2,3	-0,35	-3,3	0,42
9	К153УД3	15	0,20	2,5	0,23	3,0	-0,44
10	КМ551УД1	12	0,15	5,1	-0,17	-4,0	0,39

Примітка. При розв'язанні задачі потрібно опори R_1, R_2, R_3 вибирати із співвідношення $R_1, R_2, R_3 \ll R_{BX}$, тобто менші вхідного опору операційного підсилювача, а $R_5 > R_n$, тобто більші вихідного опору операційного підсилювача (додаток Д, табл. Д.2). Розрахунок величин резисторів можна провести, користуючись викладеним в [20].

 **Задача ОЕ.5**
(варіанти 1-38)

Розрахувати каскад транзисторного підсилювача напруги, принципова схема якого показана на рис. 4.16, і визначити h-параметри вибраного типу транзистора

Дані для розрахунку наведені в табл. 4.5.

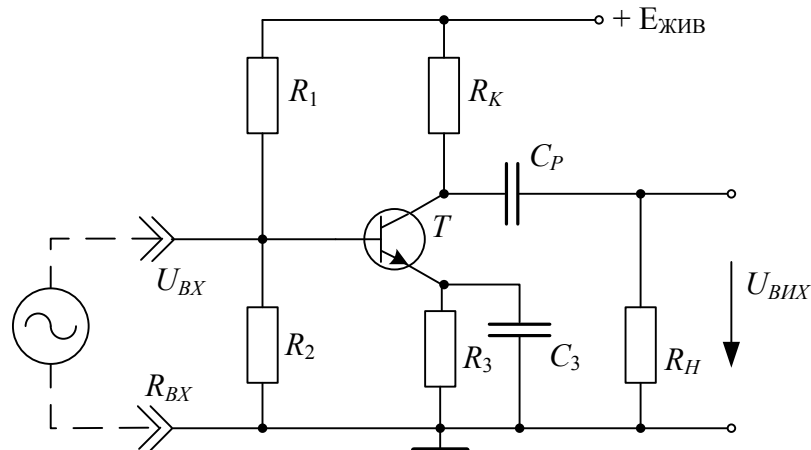


Рисунок 4.16 – Схема підсилювача зі спільним емітером до задачі ОЕ.5

Таблиця 4.5 – Вихідні дані до задачі ОЕ.5

Вар.	Дані для розрахунку				
	$U_{вих},$ В	$R_n,$ Ом	$f,$ Гц	$E_{жив},$ В	M
1	3,0	600	100	12	1,20
2	2,0	400	90	16	1,20
3	1,0	250	120	9	1,25
4	5,0	450	200	27	1,30
5	8,0	350	150	12	1,30
6	2,4	600	180	3	1,25
7	3,4	550	140	12	1,25
8	1,6	280	160	6	1,20
9	4,0	590	170	17	1,20
10	2,2	440	110	9	1,40
11	3,4	600	150	12	1,40
12	1,5	200	60	3	1,30
13	1,7	250	70	6	1,30
14	1,8	300	80	9	1,30
15	2,0	350	90	12	1,20
16	2,1	400	120	15	1,20
17	2,3	450	140	18	1,20
18	2,5	480	150	24	1,40
19	2,7	500	160	27	1,40
20	2,8	520	170	24	1,40
21	3,0	540	180	20	1,35
22	3,1	550	200	18	1,35
23	3,2	580	220	15	1,25
24	3,5	560	230	12	1,25
25	3,6	480	250	9	1,20
26	1,8	320	270	6	1,30
27	3,0	600	300	15	1,20
28	4,0	500	200	12	1,30
29	5,0	520	250	10	1,30
30	6,5	640	280	18	1,25

Продовження табл. 4.5

Вар.	Дані для розрахунку				
	$U_{вих},$ В	$R_n,$ Ом	$f,$ Гц	$E_{жив},$ В	M
31	2,5	480	300	16	1,25
32	4,5	350	230	15	1,40
33	5,0	450	270	20	1,50
34	5,0	430	350	9	1,05
35	6,0	420	250	12	1,40
36	6,0	560	150	24	1,40
37	5,5	480	170	27	1,30
38	4,0	550	190	15	1,20

Література

1. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. Г. Л. Лисенко, А. Г. Буда, Р. Р. Обертюх. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 60 с.
2. Розводюк М. П. Електротехніка. Частина І. Дослідження електричних кіл: навчальний посібник / М. П. Розводюк, Є. Я. Блінкін, В. С. Ткач. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 206 с.
3. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина ІV. Трансформатори: навчальний посібник / В.В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 219 с.
4. Электротехника / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
5. Иванов И. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи / Иванов И. И., Лукин А. Ф., Соловьев Г. И. – 2-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. – 192 с. ISBN 5-8114-0460-3.
6. Пішенін В. О. Електротехніка та мікропроцесорна техніка Частина 1. Лабораторний практикум / В. О. Пішенін, Н. В. Нікітіна - Вінниця: ВНТУ, 2004. - 71 с.
7. Монтік П. М. Електротехніка та електромеханіка: Навч. Посібник. – Львів: «Новий світ – 2000», 2007. – 500 с. – ISBN 966-418-046-6.
8. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. – Львів, «Бескид Бім», 200 Електротехніка [Текст] : підручник / В. І. Коруд, О. Є. Гамола, С. М. Малинівський. – 3-те вид., переробл. і доп. - Львів : Магнолія Плюс, 2005. – 640 с. SBN 966-8340-40-X (в пер.)
9. Загальна електротехніка : теорія і практикум [Текст] : навч. посібник для вузів / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун. – К.: Каравела, 2003. – 440 с. – ISBN 966-8019-06-7.
10. Задачник по общей электротехнике с основами электроники [Текст] : [Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов] / Т. Ф. Березкина, Н. Г. Гусев, В. В. Масленников. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1991. – 383 с.

11. Трегуб А. П. Электротехника / Под ред. Э. В. Кузнецова. – К.: Вища школа, Головное изд-во, 1987. – 600 с.
12. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник / М. С. Будіщев. – Львів: Афіша, 2001. – 424с. – ISBN 966-7760-33-2.
13. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред.. В. І. Мілих. – К.: Каравела, 2007. – 688 с. – ISBN 966-8019-85-7.
14. Основы промышленной электроники / Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1986.
15. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: навчальний посібник / За ред. А. Г. Соскова, 2-е вид. – К. : Каравела, 2004. - 432 с. - ISBN 966-8019-02-4.
16. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник [Аронов В. А., Баюков А. В., Зайцев А. А. и др.]; под общей редакцией Н. Н. Горюнова. – М.: Энергоиздат, 1982. - 904 с.
17. Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам [Текст] / В. Ю. Лавриненко. - К. : Техніка, 1984. - 424 с.
18. Малинин Р. М. Справочник радиолюбителя – конструктора / Р. М. Малинин. – М.: Энергия, 1977. – 752 с.
19. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Справочник / Под ред. Б. Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981.– 656 с.
20. Основы промышленной электроники: учебник для неэлектротехн. спец. вузов / В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, В. В. Сухоруков; под ред. В. Г. Герасимова. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1986. – 336 с.
21. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / [В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель, В. В. Коген-Далин и др.]; под ред. В. Г. Герасимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 288 с.

Глосарій

Трансформатор – transformer
Коефіцієнт трансформації – transformation factor
Коефіцієнт корисної дії – efficiency
Коефіцієнт навантаження – loading factor
Коефіцієнт потужності – power factor
Напруга короткого замикання – voltage of short circuit
Асинхронні машини – asynchronous machines
Ковзання – sliding
Критичне ковзання – critical sliding
Перевантажувальна здатність – overloading possibility
Максимальний момент – maximum moment
Номинальний момент – nominal moment
Частота обертання – rotation frequency
Електромагнітна потужність – electromagnetic power
Магнітні втрати в сталі – steel magnetic losses
Електричні втрати – electrical losses
Механічні втрати – mechanical losses
Додаткові втрати – additional losses
Обертний момент – rotation moment
Кратність пускового струму – multiplicity of starting current
Кратність пускового моменту – multiplicity of starting moment
Електропривод – electric drive
Тривалий режим роботи – long term mode of operation
Короткочасний режим – short term mode operation
Тривалість включення – duration of switching on
Повторно-короткочасний режим – repeating-short term process
Система електрозабезпечення – system for electric power supply
Електричні мережі – electric nets
Струм плавкої вставки – current of fusible insert
Допустимий струм – admissible current
Електронні випрямлячі – electronic rectifiers
Випрямляч – rectifier
Згладжувальний фільтр – smoothing filter

- Стабілізатор – stabilizer
- Середня випрямлена напруга – average rectified voltage
- Середній випрямлений струм – average rectified current
- Частота пульсацій – frequency of pulsation
- Коефіцієнт пульсацій – pulsation factor
- Некеровані випрямлячі – uncontrollable rectifiers
- Керовані випрямлячі – controllable rectifiers
- Зовнішня характеристика – external characteristic
- Максимальний середній допустимий випрямлений струм – maximum average admissible rectified current
- Зворотне допустиме значення напруги – return value of tension
- Зворотний струм – reverse current
- Прямий спад напруги – direct voltage drop

Додаток А

Технічні дані асинхронних електродвигунів

Технічні дані асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором серії 4А основного виконання дані в табл. А.1.

Таблиця А.1 – Технічні дані асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором серії 4А

Тип двигуна	$P_{ном},$ кВт	При номінальному навантаженні			λ	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$J,$ кг·м ²
		$n,$ об/хв	$\eta,$ %	$\cos\varphi$					
$n = 3000$ об/хв. (синхронна)									
4AA50A2Y3	0,09	2740	60,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0,245 \cdot 10^{-4}$
4AA50B2 Y3	0,12	2710	63,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0,268 \cdot 10^{-4}$
4AA56A2 Y3	0,18	2800	66,0	0,76	2,2	2,0	1,5	4,0	$4,14 \cdot 10^{-4}$
4AA56B2 Y3	0,25	2770	68,0	0,77	2,2	2,0	1,5	4,0	$4,65 \cdot 10^{-4}$
4AA63A2 Y3	0,37	2750	70,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$7,63 \cdot 10^{-4}$
4AA63B2 Y3	0,55	2740	73,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$9 \cdot 10^{-4}$
4A71A2 Y3	0,75	2840	77,0	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$9,75 \cdot 10^{-4}$
4A71A2 Y3	1,10	2810	77,5	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$10,5 \cdot 10^{-4}$
4A71B2 Y3	1,50	2850	81,0	0,85	2,6	2,1	1,4	6,5	$18,3 \cdot 10^{-4}$
4A80B2 Y3	2,20	2850	83,0	0,87	2,6	2,1	1,4	6,5	$21,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L2 Y3	3,0	2840	84,5	0,88	2,5	2,1	1,6	6,5	$35,3 \cdot 10^{-4}$
4A100S2 Y3	4,0	2880	86,5	0,89	2,5	2,0	1,6	7,5	$59,3 \cdot 10^{-4}$
4A100L2 Y3	5,5	2880	87,5	0,91	2,5	2,0	1,6	7,5	$75 \cdot 10^{-4}$
4A112M2Y3	7,5	2990	87,5	0,88	2,8	2,0	1,8	7,5	$1,0 \cdot 10^{-2}$
4A132H2 Y3	11,0	2990	88,0	0,90	2,8	1,7	1,5	7,5	$2,25 \cdot 10^{-2}$
4A160S2 Y3	15,0	2940	88,0	0,91	2,2	1,4	1,0	7,0	$4,75 \cdot 10^{-2}$
4A160M2 Y3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	1,0	7,0	$5,25 \cdot 10^{-2}$
4A180S2 Y3	22,0	2940	88,5	0,91	2,5	1,4	1,1	7,5	$7,0 \cdot 10^{-2}$

Продовження табл. А.1

Тип двигуна	$P_{ном},$ кВт	При номінальному навантаженні			λ	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$J,$ кг·м ²
		$n,$ об/хв	$\eta,$ %	cosφ					
$n = 1500$ об/хв. (синхронна)									
4AA50A4Y3	0,06	1380	50,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0,29 \cdot 10^{-4}$
4AA50B4Y3	0,09	1370	55,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0,325 \cdot 10^{-4}$
4AA56A4Y3	0,12	1375	63,0	0,66	2,2	2,1	1,5	3,5	$7,0 \cdot 10^{-4}$
4AA56B4Y3	0,18	1356	64,0	0,64	2,2	2,1	1,5	3,5	$7,88 \cdot 10^{-4}$
4AA63A4Y3	0,25	1380	68,0	0,65	2,2	2,0	1,5	4,0	$12,4 \cdot 10^{-4}$
4AA63B4 Y3	0,37	1365	68,0	0,69	2,2	2,0	1,5	4,0	$13 \cdot 10^{-4}$
4AA71A4Y3	0,55	1390	70,5	0,70	2,2	2,0	1,8	4,5	$13,8 \cdot 10^{-4}$
4A71B4 Y3	0,75	1390	72,0	0,73	2,2	2,0	1,8	4,5	$14,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A4 Y3	1,10	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,0	$32,3 \cdot 10^{-4}$
4A80B6 Y3	1,50	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,0	$33,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L4 Y3	2,20	1425	80,0	0,83	2,4	2,1	1,6	6,0	$56 \cdot 10^{-4}$
4A100S4 Y3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0	$86,8 \cdot 10^{-4}$
4A100L4 Y3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	$1,13 \cdot 10^{-2}$
4A112M4 Y3	5,50	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A132S4Y3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	$2,75 \cdot 10^{-2}$
4A132M4 Y3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,0	1,7	7,5	$4 \cdot 10^{-2}$
4A160S4 Y3	15,0	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$10,3 \cdot 10^{-2}$
4A160M4 Y3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$12,8 \cdot 10^{-2}$
4A180S4 Y3	22,0	1475	90,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$19 \cdot 10^{-2}$
$n = 1000$ об/хв. (синхронна)									
4AA63A6Y3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$2 \cdot 10^{-3}$
4AA63B6Y3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$22 \cdot 10^{-4}$
4A71A6Y3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	$17 \cdot 10^{-4}$
4A71B6Y3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2,0	1,8	4,0	$2 \cdot 10^{-3}$

Продовження табл. А.1

Тип двигуна	$P_{ном},$ кВт	При номінальному навантаженні			λ	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$J,$ кг·м ²
		$n,$ об/хв	$\eta,$ %	$\cos\varphi$					
4A80A6Y3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$3 \cdot 10^{-3}$
4A80B6 Y3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46 \cdot 10^{-4}$
4A90L6Y3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	$74 \cdot 10^{-4}$
4A100L6Y3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	$1,31 \cdot 10^{-2}$
4A112MB6Y3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	$2 \cdot 10^{-2}$
4A112MB6Y3	3,00	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6,0	$1,8 \cdot 10^{-2}$
4A132S6Y3	5,50	965	85,0	0,80	2,5	2,0	1,8	6,5	$4 \cdot 10^{-2}$
4A132M6Y3	7,50	970	85,5	0,81	2,5	2,0	1,8	6,5	$5,8 \cdot 10^{-2}$
4A160S6Y3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160MB6Y3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	$18,3 \cdot 10^{-2}$
4A180M6Y3	18,5	975	88,0	0,87	2,2	1,2	1,0	5,0	$22 \cdot 10^{-2}$
4A200M6Y3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$4 \cdot 10^{-2}$
$n = 750$ об/хв. (синхронна)									
4A71B8 Y3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4A80A8 Y3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4A80B8 Y3	0,55	700	64,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$40,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LA8 Y3	0,75	700	68,0	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5	$67,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LB8 Y3	1,10	700	70,0	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5	$86,3 \cdot 10^{-4}$
4A100L8 Y3	1,50	700	74,0	0,65	1,9	1,6	1,2	4,0	$1,3 \cdot 10^{-2}$
4A112MA8 Y3	2,20	700	76,5	0,71	2,2	1,9	1,4	5,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB8 Y3	3,0	700	79,0	0,74	2,2	1,9	1,4	5,0	$2,5 \cdot 10^{-2}$
4A132S8 Y3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	1,4	5,5	$4,25 \cdot 10^{-2}$
4A132M8 Y3	5,50	720	83,0	0,74	2,6	1,9	1,4	5,5	$5,75 \cdot 10^{-2}$
4A160S8 Y3	7,50	730	86,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A165M8 Y3	11,0	730	87,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$18 \cdot 10^{-2}$
4A180M8 Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,0	1,2	1,0	6,0	$25 \cdot 10^{-2}$
4A200M8 Y3	18,5	735	88,5	0,84	2,2	1,2	1,0	5,5	$40 \cdot 10^{-2}$
4A200L8 Y3	22,0	730	88,5	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$

Додаток Б

Струмові навантаження проводів та кабелів

Струмові навантаження проводів з мідними жилами, гумовою ізоляцією в металевих захисних оболонках і кабелі з мідними жилами, гумовою ізоляцією в свинцевій, поліхлорвініловій чи гумовій оболонках, броньовані і неброньовані подані в табл. Б.1.

Таблиця Б.1 – Струмові навантаження проводів

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Проводи і кабелі				
	одножильні		двожильні		трижильні
	при прокладці				
	в землі, А	в повітрі, А	в землі, А	в повітрі, А	в землі, А
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	335	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	160
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385
150	440	350	505	305	435
185	510	405	570	350	500
240	605	-	-	-	-

Струмові навантаження кабелів з алюмінієвою, гумовою або пластмасовою ізоляціями в свинцевій, поліхлорвініловій і гумовій оболонках, броньовані і неброньовані подані в табл. Б.2.

Таблиця Б.2 – Струмові навантаження кабелів

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Проводи і кабелі				
	одножильні		двожильні		трижильні
	при прокладці				
	в землі, А	в повітрі, А	в землі, А	в повітрі, А	в землі, А
2,5	23	21	34	19	29
4	231	29	42	27	38
6	338	38	55	32	46
10	60	55	80	42	70
16	75	70	105	60	90
25	105	90	135	75	115
35	130	105	160	90	140
50	165	135	205	110	175
70	210	165	245	140	210
95	250	200	295	170	255
120	295	230	340	200	295
150	340	270	390	235	335
185	390	310	440	270	385
240	465	-	-	-	-

Додаток В

Активні опори проводів

Активні опори одного кілометра мідних і алюмінієвих проводів при температурі 20°C, Ом (табл. В.1).

Таблиця В.1 – Активні опори проводів на 1 км

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Мідного проводу	Алюмінієвого проводу
0,5	36	59
0,75	24	39,4
1,0	18	29,5
1,5	12	19,65
2,5	7,2	11,6
4	4,5	7,37
6	3	4,315
10	1,8	2,95
16	1,125	1,842
25	0,72	1,18
35	0,514	0,843
50	0,36	0,59
70	0,257	0,4215
95	0,1895	0,310
120	0,15	0,2455
150	0,12	0,1965
185	0,0973	0,1593
240	0,075	0,1227

Додаток Г

Дані запобіжників

Технічні дані запобіжників 500 В змінного струму ПН2 і НПН подані в табл. Г.1.

Таблиця Г.1 – Параметри запобіжників

Тип запобіжника	Номинальний струм, А		Найбільший струм, що відключається (діюче значення), кА
	запобіжника	плавкої вставки	
НПН	40	6, 10, 15, 20, 25, 30, 40	—
ПН2-100	100	30, 40, 50, 60, 80, 100	50
ПН2-250	250	80, 100, 120, 150, 200, 250	40
ПН2-400	400	200, 250, 300, 400	25
ПН2-600	600	300, 400, 500, 600	25

Додаток Д

Параметри діодів, операційних підсилювачів та характеристики транзистора КТ312В

Таблиця Д.1 – Параметри діодів

Тип діода	Зворотна напруга $U_{зв.}$ В	Зворотний струм $I_{зв.}$ мА	Прямий спад напруги $U_{пр.}$ В	Прямий струм $I_{пр.}$ А
Д302	200	0,8	0,25	1
Д303	150	1,0	0,3	3
Д304	100	2,0	0,25	5
Д305	50	2,5	0,3	10
КД202В	100	1,0	0,9	3
КД202Г	100	1,0	1,0	1
КД202Д	200	1,0	0,9	3
КД202Е	200	1,0	1,0	1
КД202Ж	300	1,0	0,8	3
КД208А	100	0,1	1,0	1,5
КД212А	200	0,05	1,2	1
КД212Б	100	0,1	1,2	1

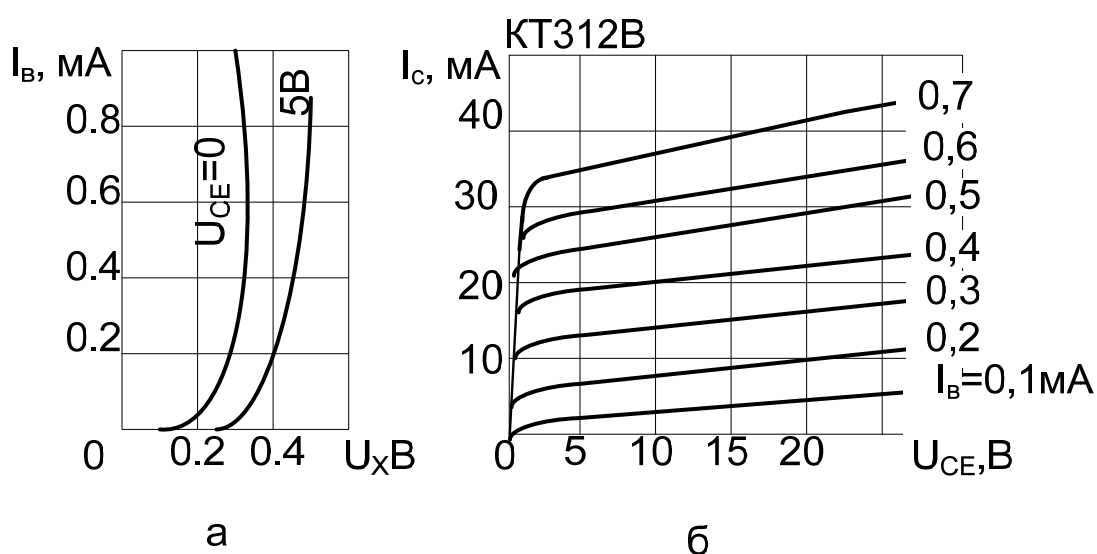


Рисунок Д.1 – Статичні характеристики транзистора КТ312В:

а – вхідні; б – вихідні

Таблиця Д.2 – Технічні дані операційних підсилювачів

Параметри підсилювача	Тип підсилювача						
	К140УД6	К140УД7	К140УД8	К140УД10	К153УД3	К551УД1	К554УД1
Коефіцієнт підсилення K_y , тис.	50	50	30	50	25	500	30
Напруга живлення $U_{ном}$, В	5...20	5...20	15	15	9...18	15	15
Струм живлення $I_{ном}$, мА	3,0	3,0	5,0	10	4,0	5,0	3,5
ЕРС зміщення $E_{зм}$, мВ	8,0	4,0	50	5,0	2,0	2,0	50
Вхідний струм $I_{вх}$, нА	50	200	0,2	500	200	125	0,5
Вхідний опір $R_{вх}$, МОм	2,0	0,5	50	0,2	0,5	1,0	10,0
Гранична частота $f_{гр}$, МГц	1,0	0,8	1,0	15	1,0	0,8	1,0
Вихідна напруга $U_{вих}$, В	12	11	10	12	12	10	10
Опір навантаження $R_{нв}$, кОм	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Навчальне видання

**Михайло Петрович Розводюк
Євген Якович Блінкін**

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
**(Електричні машини, основи електропривода,
електрозабезпечення, електроніка)**
**Контрольні та розрахунково-графічні роботи
для студентів неелектротехнічних спеціальностей**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено М. Розводюком

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.