

## **Вступ**

### **Вимоги до оформлення пояснювальної записки**

- 2.1. Текст пояснювальної записки
- 2.2. Оформлення ілюстрацій і таблиць
- 2.3. Оформлення змісту пояснювальної записки
- 2.4. Оформлення списку літератури
- 2.5. Оформлення додатків

### **Розрахунок потужності та загальні вимоги щодо вибору електродвигунів**

- 3.1. Основи теорії
- 3.2. Перевірка двигунів за умовами нагрівання прямим методом
- 3.3. Перевірка двигунів за умовами нагрівання непрямим методом
- 3.4. Вибір та перевірка за нагріванням резисторів в ланцюгах двигунів

### **Типові елементи та схеми керування електроприводами**

- 4.1. Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у функції часу
- 4.2. Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у два ступені у функції ЕРС та динамічного гальмування у функції часу
- 4.3. Типова схема пуску ДПС з послідовним збудженням у функції струму
- 4.4. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна та динамічного гальмування у функції часу
- 4.5. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором та динамічного гальмування противмиканням у функції ЕРС
- 4.6. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором в одну ступінь у функції струму та динамічного гальмування у функції швидкості

### **Вибір апаратів комутації, керування та захисту**

Додаток 1. Варіанти технічних завдань до курсової роботи

Додаток 2. Зразок оформлення принципової схеми

Додаток 3. Зразок оформлення переліку елементів

Додаток 4. Зразок оформлення титульного листа

## ВСТУП

Розрахунково-графічна робота є різновидом самостійної роботи, виконаної за завданням, відповідно до вимог навчального плану та робочої програми з конкретної дисципліни. Робота оформляється у вигляді розрахунково-пояснювальної записки, що дає повну уяву про ступінь та якість виконання технічного завдання., а також дозволяє визначити загальний рівень набутих теоретичних знань та практичних навичок з дисципліни „Електротехніка та електромеханіка” та суміжних дисциплін.

В процесі виконання розрахунково-графічної роботи студент повинен:

- навчитись аналізувати технічне завдання на проектування;
- засвоїти основні поняття та терміни, що відносяться до проектування електричних приводів;
- познайомитись з елементною базою та відповідними умовними графічними позначеннями в принципових схемах згідно ЄСКД;
- познайомитись з основними етапами проектування;
- закріпити знання методів розрахунку для вибору електродвигунів та комутаційних апаратів для некерованих електроприводів;
- отримати навички креслень принципальних схем.

### 1. ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Зміст роботи повністю відображається в пояснювальній записці, яка включає технічне завдання (ТЗ), попередні розрахунки та обґрунтування вибору електродвигуна, обґрунтування вибору принципової схеми, необхідні пояснення, коментарі щодо прийнятих наближень, графіки, таблиці та інше.

Загальні вимоги стосовно оформлення пояснювальної записки:

- повна відповідність ТЗ на курсову роботу;
- чіткість та логічність викладення матеріалу;
- обґрунтованість дій, висновків та рекомендацій.

Необхідні ілюстрації, графіки та діаграми повинні відображати кількісне співвідношення між відповідними характеристиками та параметрами.

Зміст пояснювальної записки:

- вступ;
- огляд та аналіз літературних джерел;
- виконання необхідних розрахунків та вибір електричного двигуна;
- розробка принципової схеми;
- розрахунок (якщо необхідно) та вибір вузлів та елементів принципової схеми;
- висновки;
- список літератури;
- додатки.

У вступі до розрахунково-графічної роботи студент повинен у стислій формі обґрунтувати актуальність, навівши практичні приклади, та вказати основні положення записки.

Огляд та аналіз літературних джерел містить інформацію та порівняльний аналіз про можливі варіанти вирішення проблеми, недоліки та прийняте автором рішення щодо реалізації завдання. Корисним є посилання на загальні теоретичні положення. Дослівне переписування матеріалів з літературних джерел при захисті роботи розглядається як суттєвий недолік. У випадку необхідності викладаються основоположні моменти з посиланням на джерело.

Розрахункова частина роботи є основою пояснювальної записки. При її виконанні та викладенні необхідно:

- виконати за заданими статичними характеристиками навантаження визначити розрахунковий момент двигуна;
- побудувати навантажувальну характеристику двигуна;
- визначити режим роботи двигуна за тривалістю та провести його вибір з урахуванням вимог щодо схеми електроприводу;
- виконати перевірку двигуна за умовами пуску, допустимого перевантаження та нагрівання;
- вибрати (розробити) принципову схему, яка задовольняє умовам, зазначеним в технічному завданні;
- вибрати комутаційні елементи схеми (реле, контактори та пускові реостати) з необхідними функціональними властивостями та технічними характеристиками.

При виборі схемних рішень та елементів системи керування необхідно орієнтуватись на оптимальний за техніко-економічними показниками варіант.

Розрахунково-графічна робота виконується у відповідності до вимог варіанту ТЗ, які наведено в додатку 1. Варіант ТЗ необхідно навести у пояснювальній записці як окремий підрозділ.

При виконанні розрахунків не наводити у записці виведення формул. Достатньо буде зробити посилання на джерело, з якого вона запозичена. В той же час від студента вимагається повне розуміння її змісту та умов, за яких вона була отримана.

У висновках студент повинен стисло викласти характеристику отриманим результатам, порівнюючи з вимогами технічного завдання.

Додаток з кресленням принципової схеми електроприводу виконувати з дотриманням вимог ЄСКД

## **2. ВИМОГИ ДО ОФРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ**

### **2.1. Текст пояснювальної записки**

Пояснювальна записка розрахунково-графічної роботи виконується на окремих аркушах формату А4. Запис тексту можна виконувати одним з нижче наведених способів:

- рукописним – згідно з ГОСТ 2.304 шрифтом не менше 2,5 мм;
- друкарським з однієї сторони аркушу через 2 інтервали.

Текст розміщується на одній стороні листка з полями: ліве – не менше 30 мм, праве – 10 мм; верхнє – 15 мм; нижнє – 20 мм. Дозволяється використовувати листи із спеціальними рамками. Окремі листки нумеруються (нумерація сторінок). Викладення змісту повинно бути від третьої особи, наприклад, „В [13] розроблено експериментальну методику”.

Позначення розмірностей, що ставляться після цифр, виконується в системі СІ. Якщо наводиться декілька цифр стосовно однакових фізичних величин, то позначення одиниці вимірювання ставиться після останньої цифри, наприклад: 10, 20 та 40 мТл.

Забороняється використовувати математичні знаки у тексті замість відповідних слів (> – замість „більше”).

Текст основної частини записки поділяється на розділи, підрозділи та пункти. Розділи та підрозділи пояснювальної записки повинні мати за змістом назви (заголовки). Заголовки розділів пишуться симетрично відносно середини сторінки прописними літерами, а заголовки підрозділів – з абзацу малими літерами (крім першої прописної). Переноси слів в заголовках не допускаються і крапка в кінці заголовка не ставиться. Якщо заголовок складається з декількох речень то їх розділяють крапкою. Заголовки не підкреслюються.

Відстань між заголовком і текстом може дорівнювати 3...4 міжряд-кових інтервали (15...20 мм). Відстань між текстом одного підрозділу і заголовком наступного розділу, якщо вони знаходяться на одній сторінці, приймається рівною 3...4 міжрядковим інтервалам. Заголовок підрозділу недопустимо розміщувати на даній сторінці, якщо після нього при дотриманні прийнятих інтервалів і полів не можна розмістити одного рядка тексту.

Розділи необхідно нумерувати арабськими цифрами в межах всієї пояснювальної записки, а підрозділи – арабськими цифрами в межах кожного підрозділу. Номер підрозділу повинен складатись з номера розділу та номера підрозділу, розділених крапкою. В кінці номера підрозділу ставиться крапка, наприклад, „1.2”.

Пункти нумеруються арабськими цифрами в межах кожного підрозділу, наприклад, „1.2.3.”

Абзаци в тексті починаються відступом. До абзацу входять речення, об’єднані загальним змістом.

Сторінки записки мають наскрізну нумерацію арабськими цифрами, за винятком першого аркушу (титульного листа). Нумерація починається з номера 2. Приклад оформлення титульного листа наведено у додатку 4.

## **2.2. Оформлення ілюстрацій і таблиць**

Пояснювальна записка повинна мати ілюстративний матеріал та таблиці. Об’єм ілюстративного матеріалу повинен доповнити текст записки, надаючи їй конкретності та аргументованості.

Рисунки бажано розташовувати зразу після посилання на них у записці. Якщо бракує вільного місця на одній з сторінок аркуша, то це необхідно зробити на наступній сторінці.

Ілюстрації позначати словом „Рис.” та послідовною нумерацією

арабськими цифрами в межах кожного розділу, наприклад, „Рис. 1.3” (трегій рисунок першого розділу). Допускається наскрізна нумерація рисунків без зазначення номерів розділів.

Зображення елементів конструкцій та креслень електричних схем повинно відповідати вимогам державних стандартів. Допускається для виконання креслень використовувати ЕОМ з відповідним програмним забезпеченням.

Графіки можна будувати на координатній сітці з відповідною масштабною шкалою (рівномірною або логарифмічною) по осям абсцис та ординат. У цьому випадку осі координат кресляться суцільними лініями без стрілок на їх кінцях. При відсутності координатної сітки осі координат закінчуються стрілками з зазначенням числових значень величини, що відкладаються на них, та умовних стандартних позначень цих величин.

Результати розрахунків, що відображають відповідну функціональну залежність, доцільно представити у вигляді таблиці. Останні нумеруються арабськими цифрами наскрізно в межах кожного розділу, наприклад, „Таблиця 1.3”, Цей надпис виконується над правим верхнім кутом таблиці. При посиланні на таблицю писати в тексті записки необхідно так „табл. 1.3”.

### 2.3. Оформлення „Змісту” пояснювальної записки

На першому, після титульного листа, аркуші розміщується зміст записки з зазначенням номерів та найменування всіх розділів і підрозділів, а також номерів сторінок. До змісту слід включати також бібліографічний список використаної літератури.

Всі заголовки в змісті починаються з прописної літери і крапка в кінці заголовка не ставиться. Кожний залежний заголовок (підрозділ, пункт тощо) доцільно розташовувати з відступом праворуч від попереднього основного заголовку.

Початок „Змісту” розташовують на аркуші *основний надпис по формі 2а* [8]. Бокові лінії утворюють продовження рамки основного надпису, верхня – розташовується на відстані 5...10 мм від верхнього краю листа. Наступні аркуші можуть мати рамку з ліній та основний надпис за формою 3, не мати рамки з ліній взагалі, або мати рамку з ліній, проведених на відстанях, що відповідають полям стандартної сторінки.

## **2.4. Оформлення списку літератури**

До списку літератури необхідно включити всі використані джерела за порядком появи посилань на них в тексті пояснювальної записки. В переліку джерел вказується:

- для книг: прізвище та ініціали автора (авторів), назва книги, видавництво, рік видання, кількість сторінок;
- для журнальних статей: прізвище та ініціали автора (авторів), назва статті, назва журналу, рік видання, том, номер, сторінки;
- для методичних та навчально-методичних документів: прізвище та ініціали автора (авторів, укладачів), назва документа, місто, ВНЗ, рік видання, кількість сторінок.

Приклад оформлення списку літератури можна знайти у розділі „Література” цих методичних вказівок.

При посиланнях в тексті на джерела інформації необхідно вказувати порядковий номер згідно списку літератури з виділенням його квадратними дужками, наприклад, [13].

## **2.5. Оформлення додатків**

Додатки є невід’ємною частиною записки. Кожен додаток необхідно починати з нового аркуша з зазначенням у верхньому куті слова „ДОДАТОК” та його порядкового номера. За ним, нижче і в центрі – заголовок (назва додатка).

Якщо додатком є креслення або його специфікація, то слово „ДОДАТОК” пишеться над верхньою лінією рамки основної форми. Якщо специфікація розміщена на двох і більше аркушах, то на всіх наступних пишеться „Продовження додатку 3” з зазначенням його номера, а на останньому аркуші додатку однієї назви пишеться „Закінчення додатку 3”.

# **3. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

## **3.1. Основи теорії**

Першочерговим завданням при розробці нових або модернізації існуючих електроприводів (ЕП) є вибір серійних двигунів, які найкраще задовольняють функціям, що на них покладаються.

Якщо необхідно вибрати електродвигун (ЕД) загального призначення для некерованого ЕП, то це передбачає виконання наступних умов: узгодження механічних характеристик ЕД та виконавчого органу робочого механізму (ВО РМ); дотримання відповідного режиму запуску; забезпечення допустимого рівня пере-навантаження тощо.

Вибір виконавчих ЕД для систем автоматичного керування окрім перелічених вище вимог передбачає виконання додаткових умов. По-перше, необхідно щоб виконавчий ЕД мав відповідні механічну та регульовальну характеристики; по-друге, за динамічними властивостями двигун повинен мати електромеханічну сталу  $T_m$  меншу, ніж розрахункову, визначену шляхом синтезу системи; за способом регулювання.

Конструктивне виконання ЕД повинне відповідати способу розташування в ЕП та умовам оточуючого середовища, а їх паспортні характеристики (номінальні потужність, напруга, струм, частота тощо) – бути близькими до розрахункових для конкретного ЕП.

Розрахунку потужності та вибору ЕД приділяється основна увага ще й тому, що технічні характеристики ЕД впливають на вибір решти силових елементів ЕП: основних та допоміжних комутаційних апаратів, перетворювачів та захисних пристроїв.

Найважливішою вимогою щодо вибору ЕД є забезпечення його відповідності умовам технологічного процесу. Вибрати ЕД – це означає знайти такий двигун, що забезпечує технологічний цикл (неперервний, імпульсний) робочого механізму (РМ), відповідає умовам компонування з РМ та технічним умовам експлуатації, має допустиме нагрівання.

Вибір двигуна з більшою ніж потрібно потужністю призводить до збільшення вартості ЕП, збільшення енергоємності за рахунок збільшення втрат та зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД), а для асинхронних та вентильних двигунів – зменшення коефіцієнта потужності  $\cos\phi$ .

Вибір ЕД недостатньої потужності призводить до погіршення якості технологічного процесу, зменшення продуктивності системи та можливості виникнення не передбачених аварійних ситуацій.

Отже, від оптимального вибору ЕД значною мірою залежать техніко-економічні показники ланцюга системи „ЕП - РМ”.

Вибір ЕД доцільно виконувати в такій послідовності:

- розрахунок необхідної потужності та попередній вибір ЕД;
- перевірка вибраного ЕД за умовами пуску, перевантаження та нагрівання.

Якщо попередньо вибраний ЕД задовольняє умовам перевірки, то на цьому розв’язок задачі вважається виконаним. Якщо ж попередньо вибраний ЕД не задовольняє умовам перевірки, то необхідно вибрати однотипний ЕД більшої потужності і повторити перевірку.

При проектуванні ЕП одночасно з вибором ЕД необхідно виконати розрахунок передаточного числа та вибір механічної передачі між ЕД та ВО РМ.

В подальшому будемо вважати відомими передаточне число та ККД механічної передачі.

Розрахунок потужності та попередній вибір ЕД виконується на підставі навантажувальної діаграми та діаграми швидкості (тахограми) ВО РМ. Навантажувальна діаграма ВО РМ – це графік зміни приведеного до валу ЕД статичного моменту навантаження в часі  $M_c(t)$ . Його розраховують на підставі технологічних параметрів, що характеризують роботу механізмів системи.

Як приклад наведемо формули за якими можна розрахувати моменти опору  $M_c$ , що утворюються на валу ЕД при роботі ВО деяких механізмів.

*Механізм підйомної лебідки*

$$M_c = Gr/(i\eta), \quad (3.1)$$

де  $G$  – сила тяжіння вантажу, який піднімається, Н;  $r$  – радіус барабана підйомної лебідки, м;  $i, \eta$  – передаточне число та ККД механічної передачі.

*Механізми керування підйомними кранами*

$$M_c = k_1 G(\mu r + f)/(i\eta), \quad (3.2)$$

Де  $G$  – сила тяжіння переміщуваної маси, Н;  $k_1 = 1,8 \div 2,5$  – коефіцієнт, що враховує збільшення опору руху внаслідок тертя

реборд ходових коліс об рейки;  $\mu = 0,015 \div 0,15$  коефіцієнт тертя в опорах ходових коліс;  $f = (5 \dots 12) \cdot 10^{-4}$  – коефіцієнт тертя кочення ходових коліс по рейках, м;  $r$  – радіус шийки осі ходового колеса, м.

### Вентилятори

$$M_c = k_3 Q H / (\eta_b \omega_b i \eta), \quad (3.3)$$

де  $k_3 = 1,1 \div 1,5$  – коефіцієнт запасу;  $Q$  – продуктивність вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напір (тиск) газу або повітря, Па;  $\eta_b = (0,4 \div 0,85)$  – ККД вентилятора;  $\omega_b$  – кутова швидкість крильчатки вентилятора, рад/с.

### Насоси

$$M_c = k_3 g \rho Q (H_c + \Delta H) / (\eta_n \omega_n i), \quad (3.4)$$

де  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коефіцієнт запасу;  $g = 9,81$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\rho$  – густина рідини, що перекачується насосом,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\eta_n = 0,45 \div 0,75$  – ККД насоса;  $\omega_n$  – кутова швидкість насоса, рад/с.

Тахограма ВО – це залежність швидкості руху виконавчого органу від часу  $v_{\text{во}}(t)$  або  $\omega_{\text{во}}(t)$ . Після приведення ВО до вала двигуна тахограмою буде залежність швидкості ЕД від часу  $\omega(t)$ .

На рис. 3.1, а наведено приклад навантажувальної діаграми. Видно, що ВО створює під час роботи на протязі часу  $t_1$  незмінний момент навантаження  $M_{c1}$ , а на протязі часу  $t_2$  – момент навантаження  $M_{c2}$ . Тахограма ВО (рис. 3.1, б) показує, що рух ВО складається з ділянок розгону  $t_p$ , усталеного руху  $t_y$ , гальмування  $t_r$  та паузи  $t_n$ . Тривалість робочого циклу ВО складає  $t_{\text{ц}} = t_p + t_y + t_r + t_n$ .

**Визначення розрахункової потужності двигуна.** Орієнтовно розрахунковий момент ЕД повинен задовольняти умові:

$$M_{\text{розр.}} \leq k_3 M_{\text{се}}, \quad (3.5)$$

де  $M_{ce}$  – еквівалентний момент навантаження;  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  коефіцієнт запасу, який враховує динамічні режими ЕД, коли він працює з підвищеними струмами та моментами (пуск, гальмування).

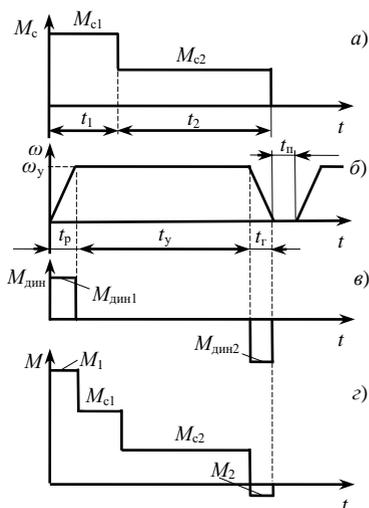


Рис. 3.1. До визначення розрахункової потужності двигуна

Якщо навантажувальна діаграма ВО подібна до зображеної на рис. 3.1, а, то  $M_{ce}$  визначається як середньоквадратична величина

$$M_{ce} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i / t_{ц}}, \quad (3.6)$$

де  $M_{ci}$ ,  $t_i$  – відповідно момент опору та тривалість часу  $i$ -ої ділянки навантажувальної діаграми.

З урахуванням  $k_3$  у виразі (3.5) для даного прикладу розрахункову швидкість ЕД слід вважати усталеною, тобто  $\omega_{розр} = \omega_y$ . Якщо ж швидкість ВО регулюється, то її розрахункове значення залежить

від способу регулювання і знаходиться більш складним шляхом.

Тоді розрахункова потужність ЕД дорівнює:

$$P_{розр} = M_{розр} \cdot \omega_{розр} = k_3 M_{ce} \omega_y. \quad (3.7)$$

**Вибір двигуна.** Тип двигуна в першу чергу повинен задовольняти вимогам щодо роду та величини напруги живлення, а його механічна характеристика – вимогам ВО. На підставі розрахунків згідно (3.7) за каталогом вибираємо найближчий ЕД більшої потужності та швидкості.

Для перевірки вибраного ЕД за умовами перевантаження необ-хідно попередньо розрахувати його навантажувальну діаграму  $M(t)$ . Цей проміжний розрахунок виконується за допомогою рівняння механічного руху ЕД:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = M_c + M_{\text{дин}}. \quad (3.8)$$

Динамічний момент  $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$  визначається як добуток сумарного приведенного моменту інерції  $J$  на визначене за допомогою тахограми (рис. 3.1, б) прискорення  $\Delta\omega/\Delta t$  на ділянці розгону та уповільнення на ділянці гальмування. Приймаючи графік на ділянках розгону та уповільнення лінійним, динамічний момент на них буде дорівнювати:

$$M_{\text{дин.р}} = J \Delta\omega/\Delta t = J \Delta\omega_y/\Delta t_p = \text{const}; \quad M_{\text{дин.г}} = -J \Delta\omega_y/\Delta t_g. \quad (3.9)$$

Знаючи графік  $M_c(t)$  та  $M_{\text{дин}}$  на відповідних ділянках роботи ЕП, можна, використовуючи вираз (3.8), побудувати навантажувальну діаграму  $M(t)$ . Після цього необхідно провести співставлення максимально допустимого моменту двигуна  $M_{\text{max}}$  з максимальним моментом  $M_1$  на навантажувальній діаграмі (рис. 3.1, з). Необхідно щоб виконувалось співвідношення :

$$M_{\text{max}} \geq M_1. \quad (3.10)$$

Якщо співвідношення (3.10) виконується, то ЕД забезпечить задану тахограму ЕП (рис. 3.1, з) на всіх ділянках, якщо ж ні – то необхідно вибрати інший двигун з більшим  $M_{\text{max}}$ .

Для ЕД постійного струму звичайного конструктивного виконання та синхронних ЕД  $M_{\text{max}} = M_{\text{доп}} = (1,5 \div 2,5)M_{\text{ном}}$ , для асинхронних двигунів (АД) можна прийняти  $M_{\text{max}} \approx M_{\text{кр}}$ , де  $M_{\text{кр}}$  – критичний момент АД.

Якщо з умов задачі виходить необхідність вибору АД з короткозамкненим ротором, то додатково виконується перевірка за умовами пуску шляхом співставлення пускового моменту  $M_{\text{п}}$  вибраного АД з моментом навантаження  $M_{\text{сп}}$

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{сп}}. \quad (3.11)$$

Для характеристик, зображених на рис. 3.1,  $M_{\text{сп}} = M_{\text{с1}}$ .

Якщо в залежності від типу вибраний двигун задовольняє умовам (3.10) або (3.11), то наступним кроком в розрахунках повинна бути його перевірка за умовами нагрівання.

**Приклад 1.** Робота ЕП характеризується навантажувальною діаграмою та тахограмою, зображеними на рис. 1.1, а, б, при цьому:

$$M_{\text{с1}} = 50 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с2}} = 25 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$t_1 = 25 \text{ с}; t_2 = 55 \text{ с}; t_p = 2 \text{ с}; t_r = 2 \text{ с}; t_y = 76 \text{ с}.$$

$$\omega_y = 120 \text{ ад/с}; J = 0,8 \text{ кГ} \cdot \text{м}^2. \quad \text{Необхідно визначити}$$

розрахунковий момент та потужність ЕД, його навантажувальну діаграму.

Розв'язок. На підставі (1.5) та (1.6) розрахунковий момент ЕД дорівнює:

$$M = kM = 1,2 \sqrt{(50^2 \cdot 25 + 25^2 \cdot 55)} / (25 + 55) = 34,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Згідно з (1.7) розрахункова потужність двигуна дорівнює

$$P_{\text{розр}} = M_{\text{розр}} \omega_{\text{розр}} = 34,8 \cdot 120 = 4176 \text{ Вт} = 4,2 \text{ кВт}.$$

Для побудови навантажувальної діаграми двигуна  $M(t)$  визначимо динамічні моменти  $M_{\text{дин.р}}$  та  $M_{\text{дин.г}}$ .

$$M_{\text{дин.р}} = j \omega_y / t_p = 0,8 \cdot 120 / 2 = 48 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.г}} = -j \omega_y / t_r = -0,8 \cdot 120 / 2 = -48 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Моменти ЕД на ділянках розгону та гальмування згідно з (1.9) дорівнюють:

$$M_1 = M_{\text{с1}} + M_{\text{дин.р}} = 50 + 48 = 98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = M_{\text{с2}} + M_{\text{дин.г}} = 25 - 48 = -23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На ділянках  $(t_1 - t_p)$  та  $(t_2 - t_r)$  з усталеним рухом момент ЕД дорівнює моментам навантаження  $M_{\text{с1}}$  та  $M_{\text{с2}}$ .

## 3.2. Перевірка двигунів за умовами нагрівання прямим методом

З урахуванням технічних характеристик та режиму експлуатації допустима температура нагрівання ЕД під час роботи в першу чергу залежить від температурної витривалості ізоляційних матеріалів, що використовуються.

В сучасних ЕД використовується різні типи ізоляції, нормативна (допустима) температура яких становить: для класу А – до 105 °С, Е – до 120 °С, В – до 130 °С, F – до 155 °С, Н – до 180, С – більше 180 °С. Серед них найбільш поширеними є класи В, F та Н.

Дотримання обмежень по допустимій температурі забезпечує нормативний термін експлуатації ЕД протягом 15–20 років. Перевищення допустимої температури викликає передчасне руйнування ізоляції і скорочення терміну служби двигунів. Так, для двигунів з класом ізоляції А перевищення допустимої температури на 8 – 10 °С скорочує термін служби удвоє.

Суть перевірки ЕД за умовами нагрівання полягає у співставленні допустимої для нього температури з тією, яку він має (матиме) в робочому стані при відповідному навантаженні. Звичайно оцінюється не абсолютна температура, а так званий перегрів  $\tau$ , який дорівнює різниці між температурою двигуна  $T_d$  та оточуючого середовища  $T_{oc}$ :

$$\tau = T_d - T_{oc}. \quad (3.12)$$

При виконанні теплових розрахунків ЕД за стандартну приймається  $T_{oc} = 40$  °С, якій відповідає номінальна потужність, зазначена в паспорті. Зменшення  $T_{oc}$  по відношенню до стандартної дозволяє навантажити ЕД на певний відрізок часу дещо більше, ніж його номінальна потужність, а за умови більш високої температури – навантаження двигуна повинно бути знижене. Використовуючи поняття перегріву слід зазначити, що ЕД буде працювати в допустимому тепловому режимі за умови:

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп}, \quad (3.13)$$

де  $\tau_{доп}$  – допустимий перегрів ЕД, що визначається класом його ізоляції;  $\tau_{max}$  – максимальний перегрів при роботі ЕД з відповідним навантаженням.

Прямий метод перевірки за нагріванням згідно умови (3.13) передбачає побудову графіка перегріву  $\tau(t)$  за цикл роботи двигуна для визначення  $\tau_{max}$ .

Проведення точного аналізу при дослідженні теплових явищ в ЕД неможливе оскільки двигун складається з сукупності деталей з різних матеріалів, що мають різні теплоємності та теплопередачу. Різними є умови нагрівання окремих частин двигуна, а напрямки теплових потоків залежать від режиму його роботи. Тому для побудови математичної моделі теплових процесів в ЕД приймаються наступні припущення: ЕД розглядається як однорідне тіло з нескінченно великою теплопровідністю та однаковою температурою у всіх своїх точках; тепловіддача у зовнішнє середовище пропорційна першому степеню різниці температур двигуна та оточуючого середовища; оточуюче середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто коефіцієнт тепловіддачі не залежить від температури двигуна.

**Стала часу нагріву ЕД.** За умови прийнятих припущень зміна перегріву двигуна в часі становить:

$$\tau = (\tau_{\text{поч}} - \tau_y) e^{-t/T_n} + \tau_y, \quad (3.14)$$

де  $\tau_y = \Delta P / A$  – усталене перевищення температури двигуна, °С;  $T_n = C / A$  – стала часу нагрівання двигуна, с;  $\Delta P$  – втрати потужності у двигуні, Вт;  $A$  – тепловіддача двигуна – кількість тепла, яке двигун видає в оточуюче середовище за 1 с при різниці температур двигуна та оточуючого середовища 1 °С, Дж/(с·°С);  $C$  – теплоємність ЕД – кількість тепла, що необхідне для підвищення температури двигуна на 1 °С, Дж/°С.

Фізичний зміст сталої нагрівання  $T_n$  полягає в тому, що вона дорівнює часу нагрівання ЕД до усталеного перегріву  $\tau_y$  за умови відсутності тепловідведення в оточуюче середовище.

Виразом (3.14) можна скористатись для розрахунків зміни перегріву ЕД як при його нагріванні, так і при охолодженні. Для цього необхідно лише підставляти в (3.14) відповідні значення  $\tau_{\text{поч}}$ ,  $\tau_y$  та сталої часу.

Оскільки стала часу  $T_n$ , що характеризує процес зміни температури, обернено пропорційна тепловіддачі двигуна, то варто зазначити, що процеси нагрівання та охолодження ЕД можуть характеризуватись різними сталими часу.

Кількісно погіршення тепловідведення характеризується

коефіцієнтом погіршення тепловідведення при нерухомому роторі:

$$\beta_0 = A_0/A, \quad (3.15)$$

де  $A_0$ ,  $A$  – тепловіддача відповідно при нерухомому роторі та номінальній швидкості обертання.

Наближені значення коефіцієнта  $\beta_0$  для двигунів:

- З незалежною вентиляцією.....1
- Без примусової вентиляції.....0,95...0,98
- Самовентильованих.....0,45...0,55
- Захищених самовентильованих.....0,25...0,35

**Стала часу охолодження двигуна.** З урахуванням (3.15) стала часу охолодження за умови нерухомого двигуна

$$T_o = T_n / \beta_0 \quad (3.16)$$

Оскільки  $\beta_0 \leq 1$ , то  $T_o \geq T_n$ , тобто охолодження нерухомого ЕД відбувається повільніше, ніж нагрівання.

На рис. 3.2. зображені нагрівання ЕД для різних  $\tau_{\text{поч}}$  та  $\Delta P$ .

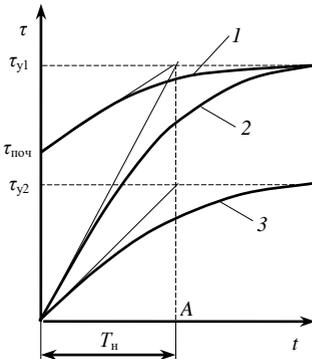


Рис. 3.2. Криві нагрівання двигуна

За умови раніше прийнятих припущень нагрівання ЕД відбувається за експоненціальним законом і характеризується сталою часу  $T_n$ . Більшим втратам (криві 1, 2) відповідає і більше значення усталеного перегріву.

З практичної точки зору процес нагрівання можна вважати усталеним, коли перевищення температури двигуна досягне рівня  $(0,95 \dots 0,98)\tau_y$  за час  $t_y \approx (3 \dots 4)T_n$ .

Таким чином, час досягнення усталеного значення перегріву залежить від сталої часу нагрівання ЕД. Оскільки теплоємність ЕД пропорційна його об'єму, а тепловіддача – площі поверхні, то двигуни більшої потужності, які мають більші габарити, мають, як правило і більшу сталу часу нагрівання. У більшості випадків стала часу нагрівання ЕД

знаходиться в межах від декількох хвилин до декількох годин.

Охолодження двигунів супроводжується зниженням перегріву за кривою 1 (рис. 3.3) при зменшенні навантаження та за кривими 2 та 3 при відключенні ЕД від мережі. Процес охолодження ЕД характеризується сталою часу  $T_0$ .

Порядок перевірки двигунів за умовами нагрівання полягає в наступному.

Використовуючи заданий графік навантаження ЕД, необхідно визначити втрати потужності на окремих ділянках циклу і на їх основі за формулою  $\tau_{yi} = \Delta P_i / A_i$  знайти значення усталеного перегріву на кожній з робочих ділянок. Потім для ділянок роботи (нагрівання) та паузи (охолодження) визначаються сталі нагрівання  $T_n$  та охолодження

$T_0 = C / A_0 = C / \beta_0 A$ . Далі за формулою (3.14) для кожної з ділянок циклу необхідно побудувати графік  $\tau(t)$ , при цьому початковим значенням  $\tau_{поч.i}$  кожної з наступних ділянок є його кінцеве значення  $\tau_{поч.(i-1)}$  на попередній ділянці.

З побудованої таким чином кривої перегріву  $\tau(t)$  знаходиться його максимальне значення та перевіряється виконання умови (3.13).

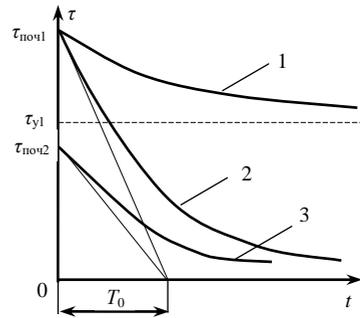


Рис. 3.3. Криві  $\tau = f(t)$  охолодження двигуна

### 3.3. Перевірка двигунів за умовами нагрівання непрямим методом

Недоліком розглянутого у попередньому розділі прямого методу перевірки двигунів за умовами нагрівання є необхідність знати їх теплові параметри – тепловіддачу  $A$  та теплоємність  $C$ . В каталогах ця інформація, як правило, відсутня, тому і використання прямого методу перевірки стає досить складним.

У більшості випадків перевірка двигунів за умовами нагрівання виконується непрямими методами які не вимагають побудови графіка кривої перегріву  $\tau(t)$ . До числа таких методів

відноситься метод середніх втрат та методи еквівалентних величин.

**Метод середніх втрат.** Це один з найбільш точних та універсальних непрямих методів. Суть цього методу полягає у визначенні середніх втрат потужності  $\Delta P_{\text{сер}}$  за робочий цикл ЕД та співставленні їх з номінальними втратами потужності  $\Delta P_{\text{ном}}$ , після чого робиться висновок стосовно теплового режиму двигуна.

Одним з основних наближень цього методу є припущення, що середній тепловий перегрів двигуна на протязі робочого циклу залишається незмінним, тобто кількість тепла, яке виділилось у двигуні за цикл, дорівнює відданому в оточуюче середовище. За таких умов середній перегрів ЕД за час циклу  $t_{\text{ц}}$

$$\tau_{\text{сер}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / A t_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{сер}} / A, \quad (3.17)$$

де  $\Delta P_{\text{сер}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / t_{\text{ц}}$  – середні втрати потужності за цикл.

Таким чином, середні втрати потужності за цикл (3.17) визначають середній перегрів двигуна  $\tau_{\text{сер}}$ . Аналогічно середні втрати потужності у двигуні визначають його допустиме нагрівання  $\tau_{\text{доп}}$ , тобто  $\tau_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}} / A$ .

З урахуванням (3.17) допустиме нагрівання ЕД буде мати місце за умови

$$\Delta P_{\text{сер}} \leq \Delta P_{\text{ном}}. \quad (3.18)$$

Співвідношення (3.18) і є основою методу середніх втрат.

У випадку, якщо на окремих ділянках циклу навантаження незмінне (рис. 3.4), то середні втрати визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{сер}} = (\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3) / (t_1 + t_2 + t_3) = \sum_1^n \Delta P_i t_i / \sum_1^n t_i. \quad (3.19)$$

де  $t_{\text{ц}} = \sum_1^n t_i$  – час циклу роботи двигуна.

Номінальні втрати потужності двигуна визначаються на підставі каталожних даних

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}} \quad (3.20)$$

Певна похибка метода середніх втрат полягає в тому, що на окремих ділянках циклу максимальний перегрів двигуна  $\tau_{\text{max}}$  може

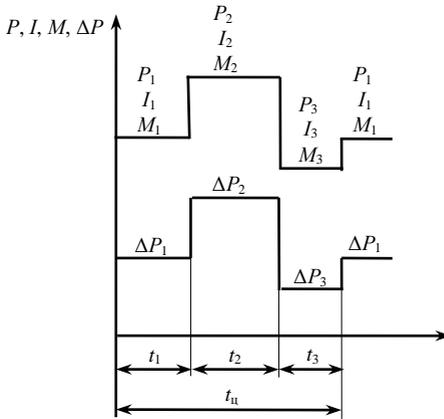


Рис. 3.4. Графік роботи двигуна з циклічним навантаженням

перевищувати  $\tau_{\text{ср}}$ . Похибка розрахунків буде мінімальною якщо стала нагрівання двигуна  $T_n$  буде значно більше, ніж найбільша тривалість ділянки циклу, тобто за умови  $t_{\text{max}} \ll T_n$ . При цьому  $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\text{max}}$ .

**Методи еквівалентних величин.** В основу цих методів покладено метод середніх втрат.

*Метод еквівалентного струму* використовується у

тому випадку, коли відомим є графік зміни струму двигуна у часі. Його можна отримати розрахунковим або експериментальним шляхом.

Розрахункову формулу метода еквівалентного струму можна отримати через середні втрати потужності у двигуні. Відомо, що вони складаються з суми постійних  $K$  та змінних  $V$  втрат. Постійні втрати практично не залежать від струму двигуна. До них відносяться втрати від тертя в підшипниках та вентиляційні втрати. Для синхронних та двигунів постійного струму з незалежним збудженням до постійних втрат відносяться і втрати в обмотці збудження.

Під змінними втратами розуміють втрати в обмотках двигунів при протіканні через них струму навантаження.

Для двигунів постійного струму змінні втрати потужності

$$V = I^2 R = I_{\text{НОМ}}^2 R (I/I_{\text{НОМ}}) = V_{\text{НОМ}} \chi^2, \quad (3.21)$$

де  $\chi = I/I_{\text{НОМ}}$  – кратність струму;  $V_{\text{НОМ}}$ ,  $I_{\text{НОМ}}$  – номінальні змінні втрати потужності та номінальний струм двигуна;  $R$  – опір обмоток.

Для трифазних асинхронних двигунів

$$V = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' \approx 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = V_{\text{НОМ}} \chi^2. \quad (3.22)$$

Для синхронних двигунів

$$V = 3I_1^2 R_1 = 3I_{\text{НОМ}}^2 R_1 (I_1/I_{\text{НОМ}}) = V_{\text{НОМ}} \chi^2. \quad (3.23)$$

Тоді повні втрати потужності двигуна з урахуванням (3.21) – (3.23)

$$\Delta P = K + V_{\text{НОМ}} \chi^2 = V_{\text{НОМ}} (\alpha + \chi^2), \quad (3.24)$$

де  $\alpha = K/V$  – коефіцієнт втрат (для більшості двигунів нормального виконання в залежності від потужності та швидкості коливається в межах 0,5 – 2).

Втрати потужності при номінальному навантаженні ( $\chi = 1$ ) знаходяться за паспортними характеристиками наступним чином:

$$\Delta P = P_{\text{НОМ}} (1 - \eta_{\text{НОМ}}) / \eta_{\text{НОМ}}, \quad (3.25)$$

де  $\eta_{\text{НОМ}}$  – номінальний ККД двигуна.

Постійні втрати потужності знаходяться як

$$K = \Delta P_{\text{НОМ}} - V_{\text{НОМ}}. \quad (3.26)$$

На підставі отриманих виразів середні втрати потужності у двигуні

$$\Delta P = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n K t_i + \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n V_{\text{НОМ}} \left( \frac{I_i}{I_{\text{НОМ}}} \right) t_i, \quad (3.27)$$

де  $\Delta P_i$ ,  $I_i$ ,  $t_i$  – втрати потужності, струм та тривалість  $i$ -тої ділянки робочого циклу;  $n$  – кількість ділянок у циклі.

З урахуванням 3.27 умова (3.18) перевірки ЕД на перегрів стане такою

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i} = I_{\text{екв}} \leq I_{\text{НОМ}}. \quad (3.28)$$

Отже, у відповідності до формули (3.28) нагрівання ЕД не перевищить допустимого рівня, якщо еквівалентний струм буде менше його номінального струму.

Варто нагадати, що розрахунки за формулою (3.28) будуть достовірними, якщо постійні втрати  $K$  та опір основних ланцюгів ЕД не змінюються на протязі циклу роботи.

*Метод еквівалентного моменту* зручно використовувати у тому випадку, коли відомо графік зміни моменту ЕД у часі  $M(t)$ . При використанні метода еквівалентного моменту додатково до зазначених умов використання метода еквівалентного струму повинна дотримуватись ще одна умова – постійність магнітного потоку на протязі всього циклу роботи.

При виконанні зазначених умов множення обох частин виразу (3.28) на  $k\Phi$  приводить до наступної формули:

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i} = M_{\text{екв}} \leq M_{\text{НОМ}}, \quad (3.29)$$

де  $M_{\text{екв}}$  – еквівалентний за умовами нагрівання момент ЕД або середньоквадратичний момент ЕД за робочий цикл.

*Метод еквівалентної потужності* використовується тоді, коли відомо графік зміни потужності у часі, а також за умови застосування методу еквівалентного моменту та постійності швидкості ЕД на всіх ділянках робочого циклу.

Якщо, наприклад, швидкість ЕД на всіх ділянках дорівнює номінальній, помноживши обидві частини виразу (3.25) на  $\omega_{\text{ном}}$ , отримаємо

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n P_i^2 t_i} = M_{\text{екв}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{екв}} \leq P_{\text{ном}}, \quad (3.30)$$

де  $P_{\text{екв}}$  – еквівалентна за умовами нагрівання потужність, що визначається як середньоквадратична потужність ЕД за робочий цикл.

**Особливості перевірки двигунів за умовами нагрівання непрямыми методами при різних режимах їх роботи.** За характером зміни навантаження на валу ЕД їх робота, а тим самим умови нагрівання та охолодження, поділяються на вісім режимів з умовним позначенням від  $S1$  до  $S8$ .

*Тривалий номінальний режим роботи (S1)* двигуна характеризується незмінним навантаженням на протязі часу, за який перегрів всіх його частин досягає усталеного значення. Графіки зміни потужності на валу  $P$ , моменту  $M$ , втрат потужності  $\Delta P$  та перегріву  $\tau$  для цього режиму зображені на рис. 3.5. Ознакою режиму  $S1$  є виконання умови  $t_p > T_H$ , де  $t_p$  – час роботи двигуна. Робота двигуна в режимі  $S1$  може відбуватись і зі змінним циклічним навантаженням.

Оскільки умовою вибору двигуна з постійним тривалим навантаженням є вираз  $P \leq P_{\text{ном}}$ , то виконуються умови  $\Delta P \leq \Delta P_{\text{ном}}$  та  $\tau_{\text{мах}} = \tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$  і немає потреби виконувати додаткові розрахунки по визначенню перегріву двигуна.

Змінне циклічне навантаження ЕД характеризується графіками (рис. 3.4). У зв'язку зі зміною при тривалому режимі роботи струму, моменту та втрат

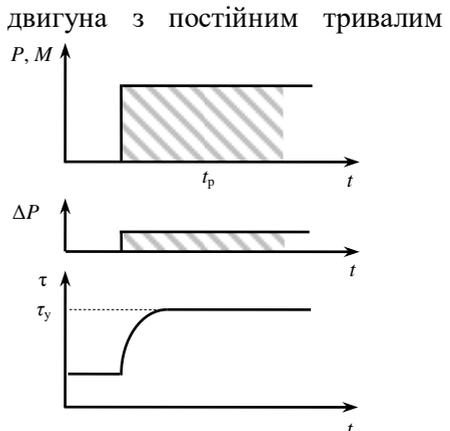


Рис. 3.5. Графіки, що характеризують тривалий (S1) режим роботи двигуна

перевірка ЕД у цьому випадку виконується методом середніх втрат або еквівалентних величин.

Короточасний номінальний режим роботи (S2) характеризується чергуванням періодів незмінного навантаження з періодами відключення двигуна; при цьому за час робочого періоду  $t_p$  перевищення температури не досягає усталеного значення, а за час знаходження у відключеному стані  $t_b$  весь двигун охолоджується до температури оточуючого середовища. Стандартні значення тривалості робочого періоду складають 10, 30, 60 та 90 хв. Графіки, які характеризують короточасний режим роботи ЕД, зображені на рис. 3.6. Режим S2 відповідає умовам  $t_p < 3T_n$ ,  $t_b > 3T_n$ .

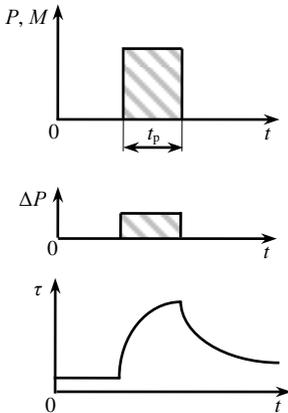


Рис. 3.6. Графіки, що характеризують короточасний (S2) режим роботи двигуна

Якщо двигун розрахований на тривалий режим роботи, то при короточасному режимі перегрів в кінці робочого періоду  $t_p$  не досягне усталеного значення, тобто двигун буде недовикористаний за умовами нагрівання, а також за потужністю. Для повного використання в режимі роботи S2 двигуна, призначеного для тривалого режиму, його необхідно перенавантажити за потужністю на валу таким чином, щоб у кінці робочого періоду його перегрів досяг допустимого рівня.

Кількісно рівень перевантаження та перегріву двигуна можна визначити за допомогою коефіцієнтів термічного та механічного перевантажень.

Коефіцієнт термічного перевантаження  $p_T$  визначається, як

$$p_T = \Delta P_k / \Delta P_{ном} = 1 / \left( 1 - e^{-t_p / T_n} \right), \quad (3.31)$$

де  $T_n$  – стала часу нагрівання двигуна.

Залежність коефіцієнта термічного перевантаження  $p_T$  при короткочасному режимі від відносної тривалості робочого періоду  $t_p/T_H$  зображена кривою 1 на рис. 3.7.

Коефіцієнт механічного перевантаження  $p_M$  визначається як

$$p_M = P_K / P_{НОМ}, \quad (3.32)$$

де  $P_K$  – потужність двигуна в короткочасному режимі;  $P_{НОМ}$  – номінальна потужність двигуна при тривалому режимі.

Порівнюючи вирази (3.31) та (3.32) видно, що з урахуванням (3.24) коефіцієнт механічного перевантаження можна виразити за допомогою коефіцієнта термічного перевантаження

$$p_T = (\alpha + p_M) / (\alpha + 1), \quad (3.33)$$

Тоді з (3.33) отримаємо

$$p_M = \sqrt{(1 + \alpha)p_T + \alpha}. \quad (3.34)$$

При співвідношеннях  $t_p/T_H = 0,3 \div 0,4$  допустимий за умовами

нагрівання коефіцієнт механічного перевантаження  $p_M \approx 2,5$  (див. рис. 3.7, крива 2), що в середньому відповідає перенавантажувальним властивостям двигунів загальнопромислових серій.

При малих співвідношеннях  $t_p/T_H$  такі двигуни за умовами нагрівання недовикористовуються і при розрахунках достатньо буде обмежитись їх перевіркою на перенавантажувальну здатність.

Промисловість випускає спеціальні типи двигунів, розраховані на короткочасний режим роботи. Вони характеризуються підвищеною

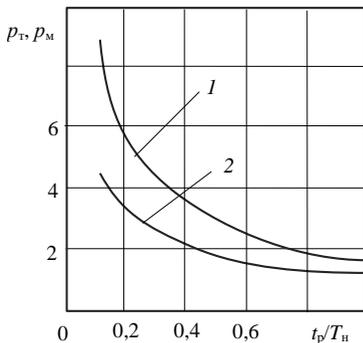


Рис. 3.7. Графіки короткочасного режиму роботи двигуна

режим роботи. Вони

перенавантажувальною здатністю, що забезпечує їх більш ефективно використання за умовами нагрівання.

Час роботи таких двигунів є нормованим і складає: 10, 30, 60 та 90 хв. Це означає, що двигун на протязі нормованого  $t_p$  може розвивати номінальну потужність, не перенавантажуючись. Потім його необхідно відключити на час, поки він повністю не охолоне до температури оточуючого середовища.

Необхідно відзначити, що двигуни призначені для роботи в короткочасному режимі, із-за підвищених постійних втрат потужності недоцільно використовувати в тривалому режимі роботи (інколи навіть в режимі холостого ходу).

*Повторно-короткочасний номінальний режим роботи (S3)* характеризується короткочасними робочими періодами  $t_p$  незмінного навантаження, які чергуються з періодами відключення  $t_b$  (рис. 3.8). Тривалість  $t_p$  та  $t_b$  така, що перевищення температури двигуна не досягають усталених значень. Цьому режиму відповідають умови  $t_p < 3T_n$  та  $t_b < 3T_b$  (рис. 3.8).

Такий режим прийнято характеризувати відносною тривалістю включення двигуна (%)

$$PB = [t_p / (t_p + t_b)] 100 = (t_p / t_{ц}) 100 \quad (3.35)$$

Більш складні графіки навантаження шляхом розрахунків еквівалентних потужності, моменту та струму можуть бути приведені до стандартного режиму (S3), зображеному на рис. 3.8.

Для повторно-короткочасного режиму роботи випускаються спеціальні серії двигунів.

Зазначена в каталогах для них номінальна потужність  $P_{ном}$  відповідає нормативній тривалості включення  $PB_n = 15, 25, 40, 60$  та 100%

Тривалість робочого циклу  $t_{ц}$  для них не повинна перевищувати 10 хв.

Якщо при повторно-короткочасному режимі

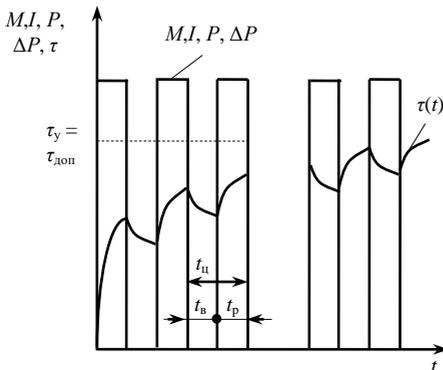


Рис. 3.8. Графіки повторно-короткочасного режиму роботи двигуна

реальні  $PB$  та потужність навантаження близькі до номінальних (паспортних), то перевірку двигуна за умовами нагрівання на проводять, оскільки нормальна робота двигуна при таких параметрах навантажувальної діаграми гарантується заводом-виготовлювачем.

Розглянемо перевірку ЕД за умовами нагрівання для випадку, коли відносна тривалість вмикання для реального циклу  $PB_1$  суттєво відрізняється від нормативної, тобто  $PB_1 \neq PB_n$ . Будемо вважати, що  $PB_1$  відповідає навантаженню  $P_1$ , а нормативній  $PB_n$  – номінальна потужність  $P_{ном}$  (рис. 3.9). На підставі методу середніх втрат можна стверджувати, що середнє перевищення температури двигуна під час роботи з навантаженням  $P_1 \neq P_n$  коли  $PB_1 \neq PB_n$  не буде перевищувати допустимої температури, якщо середні втрати потужності за цикл при  $P_1$  та  $PB_1$  не будуть перевищувати втрати за той же цикл при  $P_{ном}$  та  $PB_{ном}$ , тобто якщо

$$\Delta P_1 PB_1 \leq \Delta P_{ном} PB_{ном}. \quad (3.36)$$

З (3.36) виходить, що середня температура двигуна при роботі з потужністю  $P_1$  та  $PB_1$  не буде перевищувати допустиму, якщо

$$\Delta P_1 PB_1 / PB_{ном} \leq \Delta P_{ном}. \quad (3.37)$$

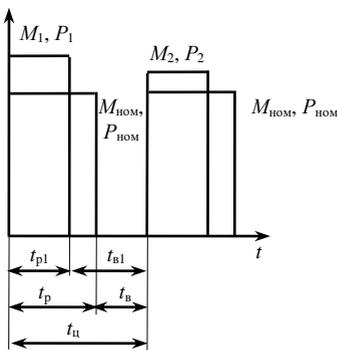


Рис. 3.9. Розрахункові графіки моменту при повторно-короткочасному режимі

Процедура перевірки двигуна за умовами нагрівання, коли  $P_1 \neq P_n$  та  $PB_1 \neq PB_n$  полягає в наступному. Визначаються втрати у двигуні  $\Delta P_1$  за час його роботи та реальна тривалість увімкнення  $PB_1$ . Потім за паспортними даними двигуна для найближчого  $PB_n$  по відношенню до визначеного  $PB_1$  знаходяться номінальні втрати  $\Delta P_1$  і виконується перевірка умови (3.37). При його виконанні нагрівання двигуна в кінці робочого циклу не буде

перевищувати нормативного.

Виразивши в (3.37) втрати потужності через постійні  $K$  та змінні  $V_{\text{ном}}$  втрати, після перетворень отримаємо:

$$I_{\text{ном}} \geq I_1 \sqrt{PB_1 / [\alpha(PB_H - PB_1) + PB_H]}. \quad (3.38)$$

За умови сталості магнітного потоку на протязі робочого циклу з (3.38) можна отримати:

$$M_{\text{ном}} \geq M_1 \sqrt{PB_1 / [\alpha(PB_H - PB_1) + PB_H]}, \quad (3.39)$$

а за умови сталості швидкості двигуна з (3.39)

$$P_{\text{ном}} \geq P_1 \sqrt{PB_1 / [\alpha(PB_H - PB_1) + PB_H]} \quad (3.40)$$

Якщо відносна тривалість увімкнення двигуна  $PB_1$  незначно відрізняється від  $PB_H$ , то добутком  $\alpha(PB_H - PB_1)$  в (1.38) – (3.40) можна нехтувати.

Іноколи при повторно-короткочасному навантаженні використовуються двигуни призначені для тривалого режиму роботи.

Розглянуті режими роботи двигунів  $S1, S2, S3$  є основним і найбільш часто зустрічаються на практиці. Решта режимів  $S4 - S8$  є різновидностями перших трьох і зустрічаються на практиці значно рідше. Перевірка двигунів за умовами нагрівання для таких режимів виконується методом середніх втрат або еквівалентних величин.

**Приклад 2.** ДПТ типу 2ПФ 200 має наступні паспортні характеристики:  $P_{\text{ном}} = 30$  кВт;  $n_{\text{ном}} = 2200$  об/хв.;  $I_{\text{ном}} = 74$  А;  $U_{\text{ном}} = 440$  В;  $\eta = 90$  %.

Оцінити тепловий режим двигуна, якщо його робочий цикл складається з наступних ділянок: час першої ділянки  $t_1 = 12$  хв, момент навантаження  $M_{c1} = 120$  Н·м; час другої ділянки  $t_2 = 25$  хв, момент навантаження  $M_{c2} = 145$  Н·м; час третьої ділянки  $t_3 = 18$  хв, момент навантаження  $M_{c3} = 100$  Н·м. Струм збудження (магнітний потік) та опір якірного ланцюга не змінюються.

Розв'язання. Зданий цикл відноситься до тривалого режиму ( $t_b = 0$ ) зі змінним навантаженням. Оскільки магнітний потік

практично не змінюється, то перевірку двигуна за умовами нагрівання виконаємо, використовуючи метод еквівалентного моменту.

Визначимо номінальні кутову швидкість та момент двигуна

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi n_{\text{НОМ}} / 30 = 3,14 \cdot 2200 / 30 = 230 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 30000 / 230 = 130,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо за (1.29) еквівалентний середньоквадратичний момент навантаження двигуна

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^3 M_{\text{ci}}^2 t_i} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 12 + 145^2 \cdot 25 + 100^2 \cdot 18}{12 + 25 + 18}} = 126,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки розрахований еквівалентний момент  $M_{\text{екв}} = 126,4 < 130,3 = M_{\text{НОМ}}$ , то двигун не буде перегріватись вище допустимого рівня.

**Приклад 3.** АД краново-металургійної серії типу МТКВ 511-8 має номінальну потужність  $P_{\text{НОМ}} = 28 \text{ кВт}$  при  $ПВ_{\text{н}} = 25\%$  та швидкість  $n_{\text{НОМ}} = 700 \text{ об/хв.}$ . Оцінити нагрівання двигуна, якщо він періодично вмикається на 3хв для подолання моменту навантаження  $M_{\text{с}} = 350 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , після чого вимикається на 5 хв. Даний цикл роботи відноситься до повторно-короткочасного режиму.

Розв'язання. Визначимо номінальні кутову швидкість та момент двигуна при  $ПВ_{\text{н}} = 25\%$

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi n_{\text{НОМ}} / 30 = 3,14 \cdot 700 / 30 = 73,3 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 28000 / 73,3 = 382 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тривалість увімкнення двигуна в циклі  $ПВ_1$

$$ПВ_1 = t_{\text{п}} / (t_{\text{п}} + t_{\text{в}}) 100\% = 3 / (3 + 5) 100\% = 37,5\%.$$

Момент навантаження двигуна при  $ПВ_{\text{н}} = 25\%$

$$M_{\text{екв}} = M_{\text{с}} \sqrt{ПВ_1 / ПВ_{\text{н}}} = 350 \sqrt{37,5 / 25} = 429 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки приведений до стандартної  $ПВ_{\text{н}} = 25\%$  момент

двигуна  $M_{\text{екв}} = 429 \text{ Н} \cdot \text{м} > 382 \text{ Н} \cdot \text{м} = M_{\text{ном}}$ , то двигун при роботі за таким циклом буде перегріватись. З метою недопущення цього явища необхідно взяти більш потужний однотипний двигун.

### 3.4. Вибір та перевірка за нагріванням резисторів в колах двигунів

Використання резисторів у відповідних ланцюгах ЕД дозволяє обмежити струми та моменти під час пуску, реверсу та гальмування, отримати необхідні штучні механічні характеристики.

Резистор вибирається за двома основними параметрами – за струмом та опором. Номінальний струм резистора повинен дорівнювати струму двигуна під час його роботи, а опір – розрахунковому значенню. Підбір величини опору виконується за допомогою відповідного електричного з'єднання окремих елементів.

Перевірка резистора за нагріванням виконується методом еквівалентного струму в залежності від режиму роботи.

Для тривалого режиму роботи перевірка резистора за нагріванням полягає в співставленні за формулою (1.28) еквівалентного робочого струму резистора з його номінальним значенням. Свідченням нормального теплового режиму буде виконання умови  $I_{\text{екв}} \leq I_{\text{ном}}$ .

У випадку короткочасного або повторно-короткочасного режимів роботи розрахунок еквівалентних струмів виконується за допомогою розрахункових коефіцієнтів, що залежать від часу роботи резистора та його сталої нагрівання. Ці залежності приведені на рис. 1.10 де  $K_{\text{к}}$  – розрахунковий коефіцієнт для короткочасного,  $K_{\text{пк}}$  – для повторно-короткочасного режиму,  $T_{\text{н}}$  – стала часу нагрівання.

Порядок перевірки попередньо вибраного резистора за нагріванням полягає в наступному. За допомогою навантажувальної характеристики двигуна спочатку визначається еквівалентний струм  $I_{\text{екв}}$ , що протікає через резистор та час його протікання  $t_{\text{р}}$  для короткочасного режиму і тривалість увімкнення  $ПВ_{\text{р}}$  для повторно-короткочасного режиму. Потім для знайдених  $t_{\text{р}}$  або  $ПВ_{\text{р}}$  за відомим значенням сталої часу нагрівання  $T_{\text{н}}$  резистора (разом з номінальним тривалим струмом приводиться в

довідниковій літературі) за допомогою кривих (рис. 3.10) знаходяться коефіцієнти  $K_k$  (короткочасний режим), або  $K_{пк}$  (повторно-короткочасний режим). Після цього визначається розрахунковий струм резистора

$$I_{розр} = I_{екв} / K_k, \text{ або } I_{розр} = I_{екв} / K_{пк} \quad (3.41)$$

і проводиться перевірка виконання умови  $I_{розр} \leq I_{ном}$ .

Електротехнічна промисловість виготовляє блоки з константа-новими та фехралевими стрічковими елементами БФ6, з константа-новими та фехралевими дротовими елементами БК12 та універсальні блоки у комбінованому виконанні. Серія БФ: містить

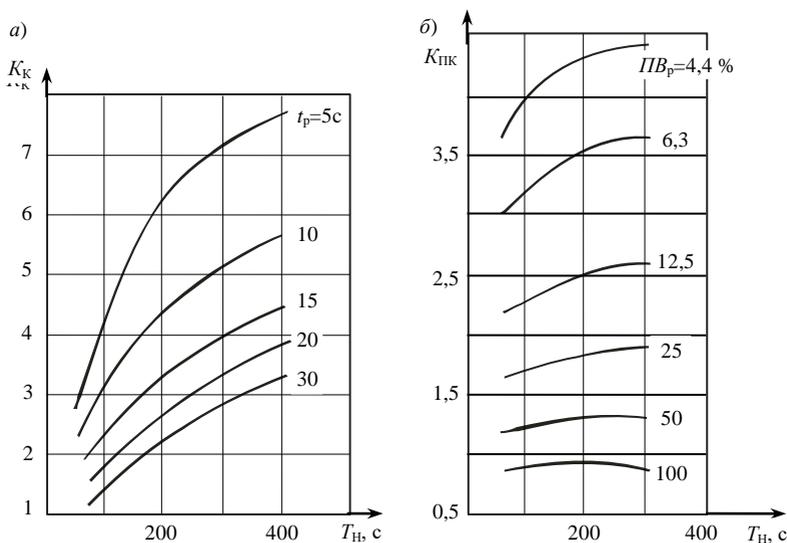


Рис. 3.10. Графіки для визначення розрахункового коефіцієнта нагрівання резисторів

шість блоків з загальним опором від 0,078 до 1,38 Ом. До серії БК12 входить 12 блоків з загальним опором від 0,7 до 96 Ом (константанові елементи) та від 2,6 до 94 Ом (фехралеві елементи).

**Приклад 4.** Двигун працює в короткочасному режимі з часом увімкнення  $t_p = 25$  с. Оцінити нагрівання постійно увімкненого в його ланцюг резистора типу БК6/0,4 ( $I_{ном} = 30$  А,  $T_n = 132$  с), якщо

через нього протікає струм  $I_{\text{екв}} = 56 \text{ А}$ .

Розв'язання. Для заданих умов за допомогою кривих (рис. 1.10, а) знаходимо, що  $K_k = 2$ .

Розрахунковий струм через резистор  $I_{\text{розр}} = I_{\text{екв}} / K_k = 56 / 2,3 = 24,3 \text{ А}$ . Оскільки  $I_{\text{розр}} < I_{\text{ном}}$ , то резистор задовольняє умовам нагрівання.

#### 4. ТИПОВІ ЕЛЕМЕНТИ ТА СХЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Керування електроприводами може передбачати пуск, реверс та гальмування двигуна. У більшості випадків ці керуючі дії виконуються у функції часу, швидкості (е.р.с), струму або шляху. Розглянемо декілька типових схем, за допомогою яких реалізуються перелічені режими.

**4.1. Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у функції часу.** До складу цієї схеми (рис. 4.1) входять кнопки керування *SB1* (пуск) та *SB2* (стоп ДПС), лінійний контактор *KM1* (забезпечує вмикання ДПС в силову мережу) та контактор прискорення *KM2* для вимикання пускового резистора  $R_d$ . Як датчик часу в схемі використовується реле часу *KT*.

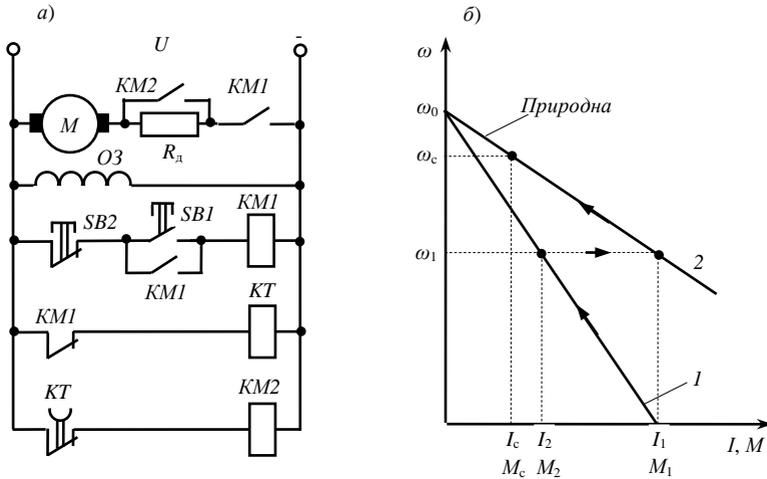


Рис. 4.1. Схема пуску ДПС у функції часу та механічна характеристика

Схема працює наступним чином. При підключенні схеми до мережі живлення (комутаційний апарат на схемі не зображено) відбувається збудження ДПС і спрацьовує реле  $KT$ , яке розмикає свій контакт у ланцюзі контактора  $KM2$ . Схема підготовлена до запуску.

Процес пуску ДПС починається після натискання на кнопку  $SB1$  в наслідок чого замикається ланцюг живлення контактора  $KM1$ , який своїм основним контактом підключає ДПС до джерела живлення, а допоміжним контактом  $KM1$  шунтує кнопку  $SB1$ , яка може бути відпущена. В цей же час розмикаючий контакт  $KM1$  розриває ланцюг живлення реле часу  $KT$ . Пусковий резистор  $R_d$  обмежує пусковий струм якоря до рівня  $I_1$ , достатній для створення необхідного пускового моменту  $M_1$ . Розгін ДПС відбувається за штучною механічною характеристикою 1 (рис. 4.1). Через інтервал часу  $\Delta t_{KT}$  після припинення живлення обмотки реле  $KT$  його нормально замкнений контакт ввімкне контактор  $KM2$  до ланцюга живлення. Останній своїм головним контактом закоротить  $R_d$ , що викличе стрибкоподібний перехід двигуна на природну характеристику 2 та подальший його розгін. Як зазначалось у попередніх розділах величина  $R_d$  розраховується за умовою, що пусковий струм  $I_1$  та відповідно і пусковий момент  $M_1$  не перевищують допустимих рівнів.

Зміни швидкості обертання, струму та моменту у часі відбуваються за експоненціальними законами:

$$\omega(t) = (\omega_{\text{поч}} - \omega_{\text{уст}})e^{-t/T_M} + \omega_{\text{уст}} \quad (4.1)$$

$$M(t) = (M_{\text{поч}} - M_{\text{уст}})e^{-t/T_M} + M_{\text{уст}} \quad (4.2)$$

В цих виразах:  $\omega_{\text{поч}}$  та  $M_{\text{поч}}$  – кутова швидкість та момент двигуна, що відповідають початку перехідного процесу на відповідній ділянці пуску двигуна;  $\omega_{\text{уст}}$  та  $M_{\text{уст}}$  – усталена швидкість та усталений момент, які буде мати двигун в кінці перехідного процесу при відповідних умовах роботи. Параметри  $\omega_{\text{уст}}$  та  $T_M$  (електромеханічна стала часу), що входять до складу (4.1) та (4.2) залежать від жорсткості механічної характеристики виконавчого органу  $\beta_c$  та жорсткості механічної характеристики двигуна  $\beta = \Delta M / \Delta \omega$ . Припускаючи, що  $\beta_c = 0$ , що відповідає досить поширеному випадку у практиці електроприводу, можна отримати:

$$T_M = J / \beta = J \omega_0 / M_{\text{кз}} ; \omega_{\text{уст}} = (M_{\text{кз}} - M_c) / \beta, \quad (4.3)$$

де  $J$ ,  $M_{\text{кз}}$  – паспортні величини моменту інерції та пускового моменту;  $\omega_0$  – швидкість ідеального холостого ходу;  $M_c$  – момент навантаження виконавчого органу.

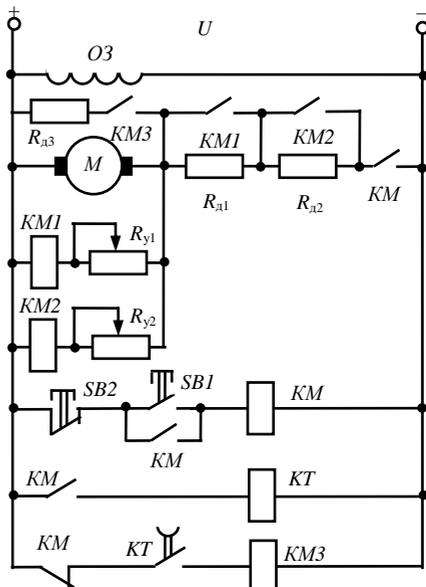
Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}}$ , за який швидкість двигуна зміниться з деякого початкового значення  $\omega_{\text{поч}}$  до кінцевого  $\omega_{\text{кін}}$ , або момент від  $M_{\text{поч}}$  до  $M_{\text{кін}}$  можна визначити шляхом логарифмування (4.1) або (4.2):

$$t_{\text{пп}} = \ln \left[ (M_{\text{уст}} - M_{\text{поч}}) / (M_{\text{уст}} - M_{\text{кін}}) \right] \quad (4.4)$$

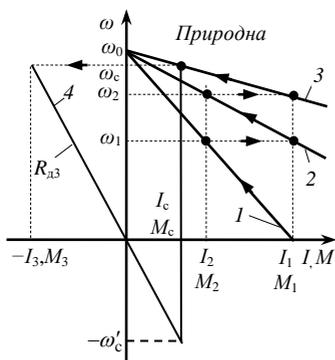
**4.2. Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у два ступені у функції ЕРС та динамічного гальмування у функції часу.** Схема, що забезпечує такий режим роботи, зображена на рис 4.2. Роль датчика ЕРС (швидкості) виконує власне сам двигун, ЕРС якоря якого пропорційна швидкості обертання.

Паралельно якорю двигуна підключені обмотки контакторів прискорення  $KM1$  та  $KM2$ . За допомогою регулювальних резисторів  $R_{y1}$  та  $R_{y2}$  настроюються на спрацьовування при відповідній швидкості двигуна. Для здійснення динамічного гальмування в схемі передбачено контактор  $KM3$  та додатковий резистор  $R_{д3}$ .

Останній обмежує максимальний струм на початку процесу гальмування. Електромагнітне реле часу  $KT$  своїм розмикаючим контактом у колі контактора гальмування забезпечує необхідну витримку часу.



**Рис. 4.2.** Схема пуску ДПС у функції ЕРС та динамічного гальмування у функції часу



**Рис. 4.3.** Механічні характеристики при двоступеневому пуску та гальмуванні

Підключення схеми до джерела живлення з напругою  $U$  призводить лише до виникнення потоку збудження, а комутаційні пристрої залишаються у початковому (нормальному) стані. Пуск ДПС відбувається шляхом натискання на кнопку  $SB1$ , що викликає спрацьовування контактора  $KM$  та підключення якорного ланцюга до джерела живлення. Розгін двигуна з

увімкненими в якірне коло додатковими резисторами  $R_{д1} + R_{д2}$  розпочинається за характеристикою 1 (рис. 4.3). Зростання швидкості викликає адекватне зростання ЕРС та напруги на обмотках контакторів  $KM1$  та  $KM2$ . При швидкості  $\omega_1$  спрацьовує контактор  $KM1$  і закорочує своїм контактом першу ступінь пускового реостата  $R_{д1}$ , що спричиняє перехід двигуна на характеристику 2. Коли швидкість досягне рівня  $\omega_2$ , то спрацює контактор  $KM2$  і закоротить другу ступінь пускового реостата  $R_{д2}$ . Двигун перейде на природну характеристику 3 і закінчить розгін в точці перетину природної характеристики та характеристики навантаження  $\omega(M_c)$ . На протязі періоду розгону та робочого режиму двигуна реле часу  $KT$  буде підключене до джерела живлення через замикаючий контакт  $KM$ . Замикаючий контакт реле  $KT$  у ланцюзі контактора  $KM3$  буде знаходитись у замкненому стані.

Перехід в режим динамічного програмування розпочинається після натискання на кнопку  $SB2$  („СТОП“). Ця оперативна дія викликає розмикання ланцюга живлення обмотки контактора  $KM$ , розрив його замикаючими контактами ланцюгів живлення якоря та реле часу  $KT$ . Розмикаючий контакт  $KM$  та замикаючий контакт  $KT$  реле часу з затримкою на відпускання підключають ланцюг контактора гальмування  $KM3$  до джерела живлення, викликаючи його спрацьовування. Головний контакт  $KM3$  підключає резистор  $R_{д3}$  до якоря і переводить двигун в режим динамічного гальмування по характеристиці 4 (рис. 1.12). Через інтервал часу, що дорівнює часу повної зупинки двигуна, контакт  $KT$  розмикає коло живлення контактора  $KM3$ . Резистор  $R_{д3}$  відключається від якоря двигуна і схема повертається до передпускового стану.

#### 4.3. Типова схема пуску ДПС з послідовним збудженням у функції струму.

У схемі, що забезпечує реалізацію зазначеної функції пуску (рис. 4.4), використовується контактор  $KA$ , обмотка якого увімкнена послідовно з якорем ДПС, а розмикаючий контакт – в коло живлення контактора прискорення  $KM2$ .

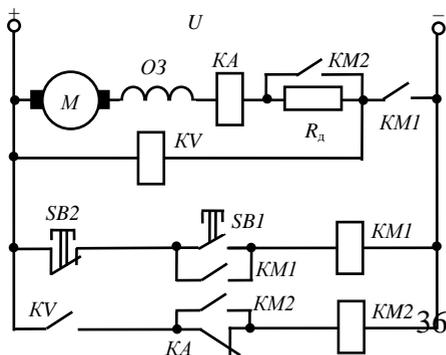


Рис. 4.4. Схема пуску ДПС з послідовним збудженням в одну ступінь у функції струму

Реле струму настроюється таким чином, щоб його струм відпускання відповідав струму  $I_2$  (див. рис. 4.1, б). У схемі також використовується допоміжне блокувальне реле  $KV$  з часом спрацьовування більшим, ніж у реле  $KA$ .

Робота схеми відбувається наступним чином. Після натискання на кнопку  $SB1$  спрацьовує контактор  $KM1$ , підключаючи послідовно з'єднані якір та обмотку збудження до джерела живлення, внаслідок чого двигун розпочинає свій розгін. Стрибок струму у якірному ланцюзі через резистор після замикання головного контакту  $KM1$  викликає спрацьовування реле  $KA$ , яке розімкне свій розмикаючий контакт у ланцюзі контактора  $KM2$ . Через незначний час після цього спрацьовує реле  $KV$  і замикає свій замикаючий контакт у ланцюзі контактора  $KM2$ , готуючи його до спрацьовування.

В міру розгону ДПС струм якоря зменшується до рівня  $I_2$ , при якому реле  $KA$  повертається до початкового (вимкненого) стану і замикає свій розмикаючий контакт у коло контактора  $KM2$ . Останній спрацьовує, при цьому його головний контакт закорочує пусковий резистор  $R_d$ , а допоміжний – шунтує контакт реле струму  $KA$ . Останнє робить неможливим стрибок струму і двигун продовжує розгін за природною характеристикою.

Натискання на кнопку  $SB2$  розриває ланцюг живлення ДПС, останній після вибігу зупиняється і схема повертається до початкового стану.

**4.4. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна та динамічного гальмування у функції часу.** Схема з такими функціональними можливостями зображена на рис. 4.5.



Інтенсивність динамічного гальмування (час гальмування) регулюється резистором  $R_r$ , з допомогою якого встановлюється необхідний постійний струм у статорі АД.

Для виключення можливості одночасного підключення статора до джерел змінного та постійного струмів в схемі використовується типове блокування за допомогою розмикаючі контактів  $KM$  та  $KMI$ , увімкнених перехресно в ланцюг обмоток цих апаратів.

**4.5. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором та динамічного гальмування противмиканням у функції ЕРС.** Схеми керування АД з фазним ротором, що випускаються на середню та велику потужність, повинні передбачувати обмеження струмів під час пуску, реверсу та гальмування за допомогою додаткових резисторів у ланцюзі ротора.

Одна з таких схем (рис. 4.6) призначена для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором та динамічного гальмування противмиканням у функції ЕРС.

Після увімкнення триполюсного вимикача  $QF$  спрацьовує реле часу  $KT$ , яке своїм розмикаючим контактом розриває ланцюг живлення контактора  $KM3$ , запобігаючи тим самим його вмиканню і передчасному закорочуванню пускових резисторів у ланцюзі ротора.

Пуск АД розпочинається після натискання на кнопку  $SBI$ , після чого спрацьовує контактор  $KMI$ . Статор АД приєднується до електро-мережі, електромагнітне гальмо  $YB$  розгальмовує систему і починається розгін АД за штучною характеристикою. Увімкнення  $KMI$  викликає одночасно спрацьовування контактора  $KM4$ , який своїми контактами шунтує не потрібний при пуску резистор противмикання  $R_{л2}$ , а також розмикає ланцюг реле часу  $KT$ . Останнє, втративши живлення, з затримкою в часі замикає свій контакт у ланцюзі контактора  $KM3$ , який спрацьовує і шунтує пусковий резистор  $R_{л1}$  у колі ротора, і АД переходить на природну характеристику.

Керування гальмуванням забезпечує реле напруги  $KV$ , що контролює рівень ЕРС (швидкість) ротора. За допомогою резистора  $R_p$  реле відрегульоване таким чином, що при пуску, коли  $0 < s < 1$ , наведена в роторі ЕРС буде недостатня для його спрацьовування, а в режимі проти включення, коли  $1 < s < 2$ , рівень

ЕРС буде достатнім для його спрацьовування.

Для здійснення гальмування АД натискається здвоєна кнопка  $SB2$ , що розриває ланцюг живлення контактора  $KM1$ . Після цього АД відключається від мережі, розмикається ланцюг живлення контактора  $KM4$  та замикається коло живлення реле  $KT$ . В результаті цих операцій контактори  $KM3$  та  $KM4$  відключаються і в ланцюг ротора АД вводиться опір  $R_{д1} + R_{д2}$ .

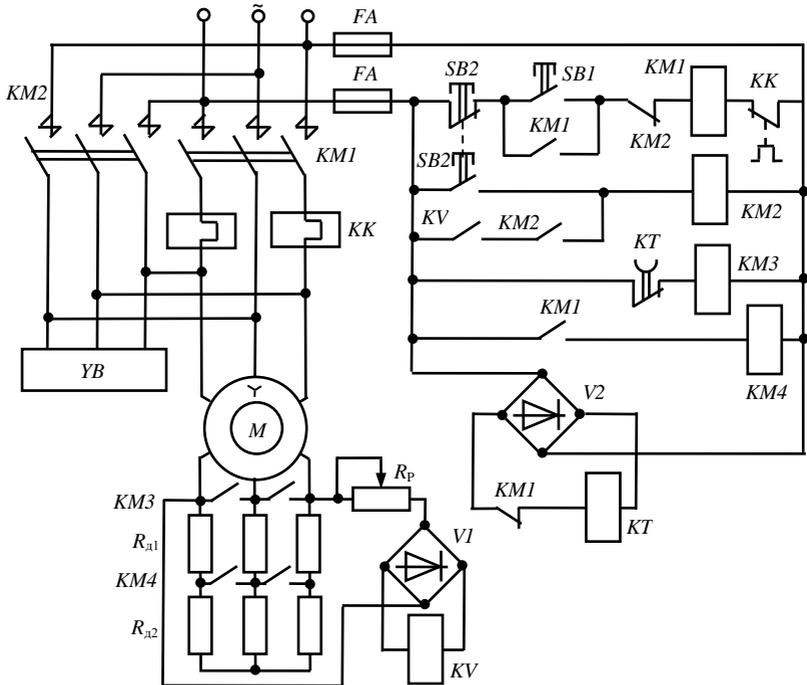


Рис. 4.6. Схема керування пуском в одну ступінь у функції часу та динамічним гальмуванням проти включенням у функції ЕРС

Натискання на кнопку  $SB2$  призводить до одночасного замикання ланцюга живлення обмотки контактора  $KM2$ , який після спрацьовування знову підключає АД до мережі, але уже з іншим чергуванням фаз напруги на статорі. АД переходить в режим динамічного гальмування методом проти включення. Реле  $KV$  спрацьовує і після відпускання кнопки  $SB2$  забезпечує живлення контактора  $KM2$  через свій контакт та замикаючий контакт цього

контактора.

У кінці гальмівного процесу, коли швидкість буде близькою до нуля (ЕРС ротора стає занадто малою), реле  $KV$  відключиться і своїм розмикаючим контактом розірве ланцюг живлення обмотки контактора  $KM2$ . Останній, втративши живлення, відключає АД від мережі і приводить схему до початкового (передпускового) стану. Після відключення  $KM2$  гальмо  $УВ$ , втративши живлення, забезпечує гальмування валу АД.

**4.6. Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором в одну ступінь у функції струму та динамічного гальмування у функції швидкості.** Схема, що дозволяє реалізувати зазначені вище функції, зображена на рис. 4.7. До її складу входять: контактори  $KM1$ ,  $KM2$  та  $KM3$ ; реле струму  $KA$ ; реле контролю швидкості  $SR$ , реле напруги проміжне  $KV$ , знижувальний трансформатор для динамічного гальмування  $T$ ; випрямляч  $VD$ .

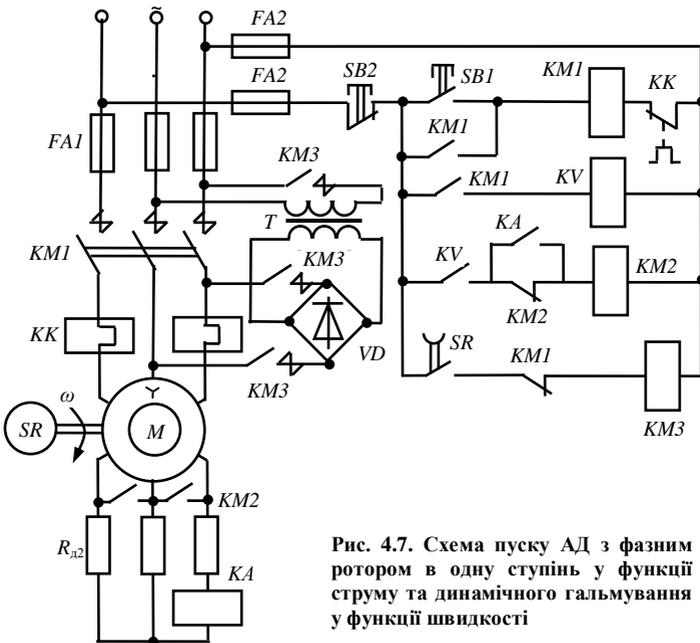


Рис. 4.7. Схема пуску АД з фазним ротором в одну ступінь у функції струму та динамічного гальмування у функції швидкості

Максимальний струмовий захист здійснюється за допомогою запобіжників  $FA1$  та  $FA2$ , захист від перенавантаження АД –

тепловими реле *KK1* та *KK2*.

Схема працює наступним чином. Після вмикання автоматичного вимикача *QF* натискається кнопка *SB1* і включається контактор *KM1*, через контакти якого напруга мережі живлення подається на статор. Стрибок струму у ланцюзі ротора викликає увімкнення реле струму *KA* та розмикання ланцюга контактора прискорення *KM2*, що викликає запуск АД з пусковим резистором  $R_{л2}$  у ланцюзі ротора.

Увімкнення контактора *KM1* викликає шунтування кнопки *SB1*, розрив ланцюга живлення контактора гальмування *KM3* та увімкнення проміжного реле напруги *KV*. Перелічені комутаційні операції не призведуть до увімкнення контактора *KM2*, оскільки ланцюг живлення його обмотки розімкнено контактом реле *KA*.

При збільшенні швидкості АД зменшується ЕРС та струм в роторі і при деякому його значенні (струмі відпускання реле *KA*) розмикаючий контакт *KA* замкне ланцюг живлення контактора *KM2*. Останній включається, шунтує пусковий резистор  $R_{л2}$ , АД переходить на свою природну характеристику.

Важливо зазначити, що обертання АД викликає замикання контакту реле контролю швидкості *SR* у ланцюзі *KM3*, але останній не спрацює, оскільки перед цим розімкнувся контакт контактора *KM1*.

Перевід АД у гальмівний режим починається з натискання кнопки *SB1*. Обмотка контактора *KM1* втрачає живлення і останній відключає АД від мережі живлення. Замкнення розмикаючого контакту *KM1* у ланцюзі контактора *KM3* викликає замикання ланцюгів живлення обмотки статора АД від випрямляча *VD*, підключеного до трансформатора *T*, і власне перевід у режим динамічного гальмування. Одночасно з цим втрачають живлення апарати *KV* та *KM2*, що викликає введення у ланцюг ротора резистора  $R_{л2}$ . Двигун починає гальмуватись.

Коли швидкість АД наблизиться до нуля, реле контролю швидкості *SR* розімкне свій контакт у ланцюзі обмотки контактора *KM3*. Останній відключиться і припинить гальмування АД. Схема прийде до початкового передпускового стану.

Інколи обмотку реле струму *KA* вмикають у фазу статора, що не впливає на принцип дії розглянутої схеми.

## 5. Вибір апаратів комутації, керування та захисту

Вибір апаратів комутації, керування та захисту для ЕП виконується з урахуванням паспортних (номінальних) даних двигуна, необхідності повного забезпечення режиму та умов роботи ЕП.

**Автоматичні вимикачі.** Ці апарати вибираються за номінальним струмом та напругою, родом струму, граничною комутаційною здатністю, електродинамічною та електротермічною стійкістю, власним часом відключення. Всі параметри автоматів повинні забезпечувати функціонування схеми ЕП як у звичайному, так і аварійному режимах, а конструктивне виконання – умовам експлуатації та загальним конструктивним вимогам до ЕП.

В автоматах з тепловим та максимальним струмовим захистом, що забезпечуються різного роду розчіплювачами, їх уставка повинна відповідати рівням відповідних струмів двигуна. Уставка максимального струмового захисту вибирається такою, щоб не було її спрацьовування під час пуску двигуна:

$$I_{ум} \geq k_n I_{пуск}, \quad (5.1)$$

де  $I_{ум}$  – уставка максимального струму спрацьовування захисту;  $k_n = 1,5 \div 2,2$  – коефіцієнт, що враховує конструктивні властивості розчіплювача та можливий розкид його струму спрацьовування відносно уставки;  $I_{пуск}$  – пусковий струм двигуна.

Тепловий захист (захист від перевантаження) вважається ефективним при наступному співвідношенні його струму уставки  $I_{у.т}$  та номінального струму

$$I_{у.т} = (1,2 \div 2,2) I_{ном}. \quad (5.2)$$

Граничною комутаційною здатністю автомата називається максимальне значення струму короткого замикання, яке він здатний увімкнути та вимкнути декілька раз, залишаючись справним.

Електродинамічна стійкість характеризується амплітудою ударного струму короткого замикання, який автомат зданий пропустити без пошкоджень.

Термічна стійкість характеризується допустимою кількістю

тепла, яке може бути виділене в автоматі за час дії струму короткого замикання.

Для визначення відповідності вище перелічених параметрів автоматів умовам роботи ЕП необхідно попередньо розрахувати струми короткого замикання

**Електромагнітні апарати (контактори, реле, магнітні пускачі).** Електромагнітні апарати вибираються за наступними параметрами: характер та величина напруги головного ланцюга і ланцюга керування (вмикаючих обмоток); комутаційна здатність контактів і їх кількість; допустима частота вмикань; режим роботи; категорія розташування; степінь захисту від впливу зовнішнього середовища.

Додатково до зазначених показників реле, що виконують функції керування та захисту, вибираються за родом входної величини (струм, напруга, потужність), витримкою часу, коефіцієнтом повернення, часом спрацьовування та часом відпускання.

**Вимикачі та перемикачі.** Ці апарати вибираються за родом та величиною напруги, струмом навантаження, кількістю перемикачів, які вони допускають за умовами механічної та електричної зносостійкості, а також конструктивним виконанням.

**Кнопки та ключі керування.** Вони вибираються за родом та рівнем напруги, величиною комутуваного струму, кількістю комутуваних ланцюгів, ступенем захисту та кліматичним виконанням, електричною та механічною зносостійкостями.

**Запобіжники.** Запобіжники (плавкі вставки) вибираються такими, щоб вони не перегорали під час пуску двигуна. Для АД з коротко-замкненим ротором, час пуску яких не перевищує 5 с, струм плавкої вставки

$$I_{п.в} = I_{пуск} / 2,5 \quad (5.3)$$

а коли час пуску більше 5 с, то

$$I_{п.в} = I_{пуск} / (1,6 \div 2). \quad (5.4)$$

Для АД з фазним ротором та ДПС звичайного виконання струм плавкої ставки розраховується за відношенням до номінального

струму

$$I_{п.в} \geq (1 \dots 1,25) I_{ном}. \quad (5.5)$$

Для захисту ланцюгів керування струм плавкої вставки вибирається згідно умови:

$$I_{п.в} \geq 2,5 I_{\Sigma}, \quad (5.6)$$

де  $I_{\Sigma}$  – сумарний струм обмоток одночасно увімкнених апаратів у схемі керування.

**Реле максимально струму.** Уставка струму при захисті АД з короткозамкненим ротором вибирається за співвідношенням:

$$I_{у.с} = (1,2 \dots 1,3) I_{пуск}, \quad (5.7)$$

а для АД з фазним ротором та ДПС

$$I_{у.с} = (2 \dots 2,5) I_{пуск}. \quad (5.8)$$

## ДОДАТОК 1

### Варіанти технічних завдань розрахунково-графічної роботи

№ вар.	Навантажувальна характеристика				Тахограма					J, кГ·м <sup>2</sup>	Електропривід на базі типової схеми №
	M <sub>c1</sub> , Н·м	M <sub>c2</sub> , Н·м	t <sub>1</sub> , с	t <sub>2</sub> , с	t <sub>p</sub> , с	t <sub>r</sub> , с	t <sub>y</sub> , с	t <sub>n</sub> , с	ω <sub>уст</sub> , рад/с		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	30	50	15	45	5	3	52	10	140	0,8	1
2.	20	45	25	35	4	3	53	8	120	0,9	2
3.	50	30	10	50	2	1	57	6	100	1,0	3
4.	60	20	25	55	3	2	75	10	130	1,1	4
5.	70	30	20	60	4	4	72	8	120	0,9	5
6.	40	30	30	30	3	1	56	6	100	1,2	6
7.	50	40	40	40	6	4	70	10	140	1,3	1
8.	30	60	30	50	5	3	72	8	130	1,2	2
9.	20	70	20	50	4	3	63	6	120	1,0	3
10.	50	50	30	40	2	1	67	10	125	1,1	4
11.	40	50	25	45	3	2	65	8	100	0,9	5
12.	50	30	45	15	4	4	52	6	80	0,7	6
13.	45	20	35	25	3	1	56	10	90	0,8	1
14.	30	50	50	10	6	4	50	8	110	1,0	2
15.	20	60	55	25	8	4	68	5	100	0,9	3
16.	30	70	60	20	7	3	70	12	160	1,4	4
17.	40	30	40	40	8	2	70	10	120	1,1	5
18.	40	50	30	30	4	3	53	13	130	1,2	6
19.	60	30	50	30	6	2	72	14	140	1,3	1
20.	70	20	50	20	5	3	62	15	150	1,4	2
21.	50	40	40	30	3	2	65	16	170	1,5	3
22.	60	40	45	25	4	2	64	14	145	1,4	4
23.	70	15	60	20	6	4	70	12	140	1,1	5
24.	30	70	70	20	8	4	78	10	120	1,2	6
25.	80	20	65	25	7	3	80	13	100	1,3	1
26.	80	10	50	40	8	2	80	14	130	1,4	2
27.	55	35	80	10	4	3	83	15	120	1,5	3
28.	55	25	75	15	6	2	82	16	100	1,4	4
29.	70	40	70	30	5	3	92	14	140	0,9	5
30.	80	30	65	35	3	2	95	12	130	1,4	6
31.	90	20	75	25	4	2	94	10	120	1,1	1
32.	100	10	85	15	8	3	89	13	125	1,2	2
33.	75	25	90	10	10	2	88	14	100	1,3	3
34.	85	15	90	30	10	3	107	15	80	1,4	4
35.	90	30	80	40	8	4	108	16	90	1,5	5

36.	95	25	75	35	7	3	100	14	110	1,4	6
37.	90	30	60	30	6	2	82	12	100	1,1	1
38.	100	20	90	45	10	5	120	10	160	1,2	2
39.	80	40	80	50	8	5	117	13	120	1,3	3
40.	70	50	100	50	12	6	132	14	130	1,4	4
41.	70	80	95	45	10	4	126	15	140	1,5	5
42.	90	60	80	60	8	5	127	16	150	1,4	6
43.	110	40	110	30	12	3	125	18	170	1,0	1
44.	100	50	100	25	10	4	111	12	145	1,2	2
45.	120	40	130	35	12	6	147	15	150	1,3	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
46.	120	40	130	35	12	6	147	15	150	1,3	3
47.	110	50	140	45	16	6	163	20	160	1,4	4
48.	100	60	100	40	12	4	124	16	180	1,5	5
49.	120	30	120	40	14	5	141	16	190	1,6	6
50.	130	45	140	50	16	6	168	30	180	1,7	1

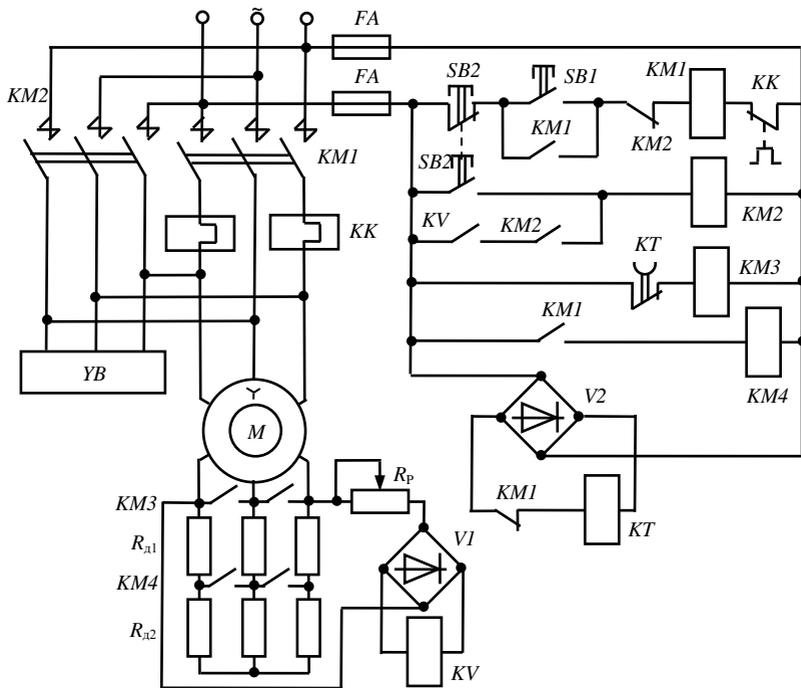
**Таблиця 1**

**Варіанти типових схем електроприводу**

1.	Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у функції часу
2.	Типова схема пуску двигуна постійного струму незалежного збудження у два ступені у функції ЕРС та динамічного гальмування у функції часу
3.	Типова схема пуску ДПС з послідовним збудженням у функції струму
4.	Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна та динамічного гальмування у функції часу
5.	Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором та динамічного гальмування противмиканням у функції ЕРС
6.	Типова схема для прямого пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором в одну ступінь у функції струму та динамічного гальмування у функції швидкості

**Примітка.** Якщо неможливо синтезувати схему ЕП у відповідності з технічним завданням, студенту дозволяється обґрунтовано вибрати іншу структуру схеми при незмінному типі електроприводу, або вибрати інший тип електроприводу.





						ІКАТ.4630000.XXX.ПЗ		
							Лі тера	М аса
м	рк	№ Докум	Пі дпис	Д ата				
	Розр об.	Іванов			Нерегульованний асинхронний електропривід. Схема електрична принципова			
	Пере вір.	Плечистий						
	Т. контр.							
							Арку ш	А і
	Н. Конт. Затв.			49			ЖІТІ АТ - 8	

**ДОДАТОК 2**

**ДОДАТОК 3**

<i>о н а</i>	<i>По з. по значен ня</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кі льк.</i>	<i>При мітка</i>
		<b><i>Двигуни</i></b>		
	<i>M</i>	<i>МА146-1</i>	<i>1</i>	
		<b><i>Резистори</i></b>		
	<i>R<sub>p</sub></i>			
	<i>R<sub>д1</sub></i>	<i>КФ-22М</i>	<i>3</i>	
	<i>R<sub>д2</sub></i>	<i>КФ-22М</i>	<i>3</i>	
		<b><i>Діоди</i></b>		
	<i>V1</i>			
	<i>V2</i>			
		<b><i>Контактори (магнітні пускачі)</i></b>		
	<i>K M1</i>	<i>КТВ-32</i>	<i>1</i>	
	<i>K M2</i>	<i>КТВ-32</i>	<i>1</i>	
	<i>K M3</i>	<i>КТВ</i>	<i>1</i>	
	<i>K M4</i>	<i>КТВ</i>	<i>1</i>	
		<b><i>Реле</i></b>		
	<i>КТ</i>	<i>ВЛ-55</i>	<i>1</i>	
	<i>КV</i>	<i>РЭВ301</i>	<i>1</i>	
		<b><i>Ключі керування</i></b>		
	<i>SB 1</i>	<i>КУ100-2М</i>	<i>1</i>	
	<i>SB 2</i>	<i>КУ122-1М</i>	<i>1</i>	
		<b><i>Запобіжники</i></b>		
	<i>FA</i>	<i>ПР-2</i>	<i>2</i>	
		<i>НПН15</i>	<i>3</i>	
		<i>51</i>		



Зразок оформлення титульного листа

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА  
ПОЛІТЕХНІКА»

Група ЕТ-ХХ-Х  
Кафедра АіКТ

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД**

Курсова робота

Пояснювальна записка

**МКАТ. 463xxx xxx. ПЗ**

Керівник ( )

Виконавець ( )

Житомир  
2025

## ЛІТЕРАТУРА

1. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 290 с.
2. Електропривод виробничих машин і механізмів: навч. посіб. / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; за ред. О. Ю. Синявського. – К.: ФОП Ямчинський О. В., 2020. – 444 с.
3. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Ч. 1: навч. посіб. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
4. Красношапка Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 101 с.
5. Матвійчук В. А., Стаднік М. І., Рубаненко О. О. Електропривод виробничих машин і механізмів: навч. посібник з виконання курсової роботи. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – 320 с.
6. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода: конспект лекцій. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
7. Електропривод / [Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко та ін.]; за ред. Ю. М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2016. – 504 с.
8. Павленко Т. П., Донець О. В., Петренко О. М. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018.