

Хмельницький національний університет  
Міністерства освіти і науки України

# Електротехніка та електроніка: Електричні машини

Методичні вказівки до виконання практичних занять  
для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»

Затверджено на засіданні кафедри  
фізики і електротехніки

Протокол від №10 від 3.04.2020р.

Хмельницький, 2020

Електротехніка та електромеханіка: електричні машини. Методичні вказівки до виконання практичних занять з вивчення електричних машин для студентів денної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. В. Горошко, В. Д. Косенков, А. С. Каштальян – Хмельницький: ХНУ, 2020. – 39.

Укладачі: Горошко А.В., д.т.н., професор,  
Косенков В.Д., к.т.н., професор  
Каштальян А.С., к.т.н., доцент,

Відповідальний за випуск: Косенков В.Д., к.т.н., професор.

## ВСТУП

Практичні заняття є найважливішим структурним елементом предметної підготовки з електротехніки та електромеханіки, оскільки об'єднують теоретико-методологічні знання і практичні вміння студентів в єдиній навчально-дослідницькій діяльності.

Методичні вказівки до виконання практичних занять охоплюють усі практичні роботи з теми «Електричні машини», виконання яких передбачено робочою програмою навчальної дисципліни «Електротехніка та електромеханіка» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Дисципліна «Електротехніка та електромеханіка» вивчається студентами на другому курсі. Вона є однією зі спеціальних дисциплін і займає провідне місце у підготовці бакалаврів. На основі загальних понять про електричний струм, законів Кірхгофа та Ома, компонентних рівнянь, тут розглядають застосування електричних і магнітних явищ для отримання, розподілу, перетворення і споживання електричної енергії, зокрема із застосуванням трансформаторів, машин постійного і змінного струму, датчиків тощо. Метою вивчення електротехніки і електромеханіки є ознайомлення студентів з існуючими методами аналізу електричних та магнітних кіл в усталених та перехідних процесах, при постійних та змінних струмах та напругах, а також з роботою машин постійного і змінного струму в засобах автоматики.

Під час вивчення електротехніки і електромеханіки значна увага приділяється темі «Електричні машини». Для успішного оволодіння студентами теоретичного матеріалу й застосування його для розв'язання задач й аналізу отриманих результатів з теми «Електричні машини» робочою програмою передбачені практичні заняття. Викладений у методичних вказівках матеріал відповідає фаховим компетентностям бакалавра спеціальності 151 щодо здатності застосовувати знання електротехніки в обсязі, необхідному для розуміння процесів в системах автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологіях.

Практичні заняття проводяться з метою успішного освоєння студентами теоретичного матеріалу й застосування його для розв'язання задач й аналізу отриманих результатів. Завдання до практичних занять охоплюють питання конструкції, принципу дії та розрахунку трансформаторів, машин змінного і постійного струму, керування електроприводами.

Студенти, які успішно завершили практичні заняття, мають: володіти професійною термінологією та основними поняттями з функціонування електричних машин, принципами роботи та основами розрахунку трансформаторів, електричних машин та електроприводу; визначати основні характеристики електричних машин; застосовувати набуті знання для вибору електрообладнання при вирішенні практичних потреб виробництва.

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Завдання до практичних занять охоплюють питання розрахунку трансформаторів, електричних машин змінного та постійного струму та схем керування електроприводами. Під час практичних занять студенти оволодівають навиками аналізу роботи електричних машин, уміння розраховувати основні їх параметри, здійснювати підбір електричних машин згідно вимог, поставлених у задачі, аналізувати їх роботу в різних режимах.

Кожне завдання містить стислі теоретичні відомості, необхідні для виконання практичних робіт, перелік питань для самоперевірки знань теоретичного матеріалу, розрахункову задачу для самостійного виконання і приклад її розрахунку.

Важливою умовою успішного виконання практичного заняття є попередня підготовка студента. Вона здійснюється за матеріалами лекцій, консультацій, за рахунок часу, відведеного на самостійну роботу студент.

В методичних вказівках передбачено методи діагностики у вигляді розв'язання задач. Студенти обирають вихідні дані до задачі з поданих до них таблиць згідно номеру у списку групи. Усі задачі виконуються студентами індивідуально і оформлюються як окрема робота, яка подається на перевірку викладачу. У разі дистанційного навчання виконані роботи висилаються викладачу у електронному вигляді. Робота оцінюється за чотирибальною шкалою.

Критерії оцінювання. Оцінка, яка виставляється за практичне заняття, складається з таких елементів: вхідного контролю; знання теоретичного матеріалу з теми; якість оформлення задачі і графічної частини; вміння студента обґрунтувати прийняті конструктивні рішення; своєчасне подання роботи на перевірку. Вхідний контроль проводиться у вигляді усного опитування студентів перед допуском до виконання практичного заняття і передбачає перевірку того, що завдання було зрозуміло правильно. захист практичного заняття проводиться в усній або письмовій формі і передбачає перевірку знань та вмінь студентів, отриманих під час її виконання.

Оцінка «відмінно» виставляється студенту, який без помилок пройшов вхідний контроль; самостійно виконав розрахункову частину практичного заняття за відведений час. Обчислені результати є зрозумілими, таблиці і графіки виконані акуратно і згідно завдання; під час захисту практичного заняття студент дав повні відповіді на контрольні питання і допустив не більше двох-трьох незначних та некритичних похибок.

Оцінка «добре» виставляється студенту, який пройшов вхідний контроль без суттєвих помилок; самостійно виконав розрахункову частину практичного заняття за відведений час із несуттєвими помилками. Обчислені результати є зрозумілими, таблиці і графіки виконані акуратно і згідно завдання; під час захисту практичного заняття дав відповіді на контрольні питання і допустив не більше двох-трьох несуттєвих помилок.

Оцінка «задовільно» виставляється студенту, який пройшов вхідний контроль із суттєвими помилками; виконав розрахункову частину практичного заняття не у повній мірі самостійно або не за відведений час або із суттєвими помилками. Обчислені результати, таблиці та графіки виконанні не відповідають завданню; під час захисту роботи студент дав відповіді на контрольні питання допустивши суттєві помилки.

Оцінка «незадовільно» виставляється студенту, який не пройшов вхідний контроль; не виконав розрахункову частину практичного заняття або виконав незначну її частину, або виконав у повній невідповідності із завданням; під час захисту лабораторної роботи допустив суттєві помилки при відповіді на контрольні питання.

В кінці кожної практичного заняття містяться контрольні запитання, які дають змогу підготуватися до виконання та захисту практичного заняття.

## ТЕМА 1. ТРАНСФОРМАТОРИ

**Мета** — оволодіння знаннями з принципу дії та конструкції трансформаторів, а також розрахунку їх параметрів.

**Завдання:** вивчити принцип роботи трансформатора, особливості режимів холостого ходу і короткого замикання, основні розрахункові залежності, навчитись розраховувати струм холостого ходу, коефіцієнт трансформації, параметри повної схеми заміщення трансформатора.

### 1.1 Теоретичні відомості.

Перед тим, як приступити до вивчення розділу про трансформатори, необхідно повторити основний закон електромагнетизму — закон електромагнітної індукції — і явища самоіндукції та взаєміндукції, які лежать у основі принципу роботи трансформатора.

Режим холостого ходу для первинної обмотки трансформатора є аналогічним до режиму роботи котушки з феромагнітним осердям, тому цей розділ курсу теж слід повторити перед вивченням теми.

У електротехніці коефіцієнтом трансформації  $n$  називають відношення номінальної вищої напруги до номінальної нижчої напруги, тобто  $n = U_{\text{вн}} / U_{\text{нн}}$ , причому під номінальною розуміють напругу на обмотках трансформатора, що працює у режимі холостого ходу.

Під номінальною потужністю трансформатора розуміють його повну потужність  $S_n$  у номінальному режимі  $S_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n}$ .

Для зручності і спрощення розрахунків величини вторинного кола приводять до кількості витків первинної обмотки:

$$U'_2 = nU_2, I'_2 = I_2/n, R'_2 = n^2 R_2, X'_2 = n^2 X_2, Z'_2 = n^2 Z_2.$$

Трансформатор в цьому випадку називають приведеними.

У роботі трансформатора важливе значення має те положення, що при зміні його навантаження при постійній первинній напрузі магнітний потік можна вважати практично постійним, оскільки  $U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$ .

Оскільки  $\Phi \approx const$ , то алгебраїчна сума МРС, які створюють цей потік, є в будь-якому режимі однаковою, тобто

$$I_{1x} w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2$$

де  $I_{1x}$  - струм холостого ходу трансформатора,  $I_1$  і  $I_2$  - відповідно струми первинної і вторинної обмоток при навантаженні.

Будь-яка зміна струму  $I_2$  приводить до такої зміни струму  $I_1$ , при якому загальна МРС обмоток лишається незмінною. Положення про незмінність

магнітного потоку відноситься не лише до трансформаторів, але і до машин змінного струму – асинхронним і синхронним.

Робота приведеного трансформатора у всіх режимах описується трьома рівняннями:

- рівняннями електричного стану первинного кола:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{R}_1 \underline{I}_1 + j \underline{X}_1 \underline{I}_1 ;$$

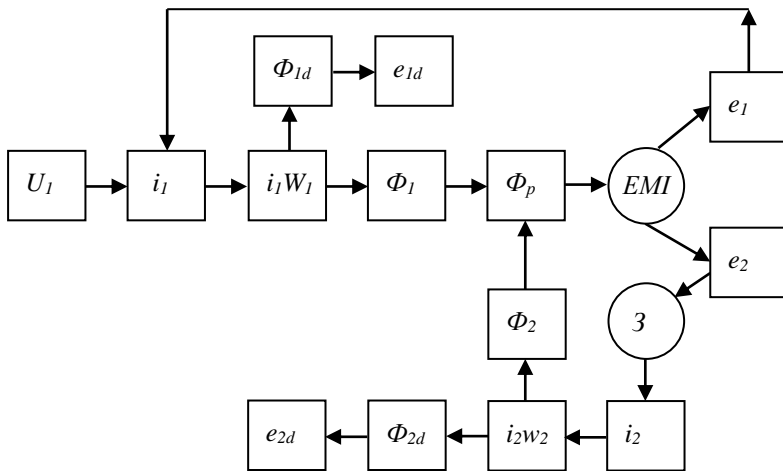
- рівнянням електричного стану вторинного кола:

$$\underline{E}'_2 = \underline{U}'_2 + \underline{R}'_2 \underline{I}'_2 + j \underline{X}'_2 \underline{I}'_2 ;$$

- рівнянням МРС:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = \underline{I}_x .$$

Для кращого розуміння принципу роботи навантаженого трансформатора доцільно використовувати так звану умовно-логічну схему (рис. 1.1), яка читається наступним чином.



**Рис. 1.1 – Умовно-логічна схема роботи трансформатора**

До первинної обмотки підводиться синусоїдальна напруга  $u_1$ , під дією якої у обмотці виникає струм  $i_1$  і створюється МРС  $i_1 w_1$ . Ця МРС викликає магнітний потік  $\Phi_1$  і потік розсіювання  $\Phi_{1p}$ . Магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  (про потоки буде сказано пізніше) створюють результуючий потік  $\Phi_p$ , який відповідно до закону електромагнітної індукції (ЕМІ на рис. 1) наводить у

первинній і вторинній обмотках відповідно ЕРС  $e_1$  і  $e_2$ . Оскільки вторинна обмотка є замкнутою, то по ній тече струм  $i_2$ , який створює МРС  $i_2 w_2$ , а остання – потік  $\Phi_2$ . В силу закону збереження енергії МРС  $i_2 w_2$  і потік  $\Phi_2$  направлені відповідно протилежно до напрямку МРС  $i_1 w_1$  і потоку  $\Phi_1$ , тобто потік вторинної обмотки прагне розмагнітити трансформатор.

При зміні струму  $i_2$ , наприклад у напрямі зростання, потік  $\Phi_2$  збільшується, магнітний потік  $\Phi_p$  і ЕРС  $e_1$  зменшуються, а струм  $i_1$  збільшується доти, поки  $\Phi_p$  не досягне початкового значення. Таким чином, у трансформаторі є два зворотних зв'язки: від струму  $i_2$  до магнітного потоку  $\Phi_p$  і від потоку  $\Phi_p$  до ЕРС  $e_1$  і струму  $i_1$ .

Векторна діаграма трансформатора дає змогу наочно уявити співвідношення і кути зсуву фаз між різноманітними величинами. Її будують, базуючись на рівняннях трансформатора, наведених у п. 8.

При побудові векторних діаграм трансформатора слід мати на увазі, що лише перший крок є довільним. Нехай, наприклад, з довільно вибраної точки у довільному напрямі проведений вектор струму  $\underline{I}_2$ ; решта побудов будуть обумовлені, з однієї сторони, заданими значеннями кута  $\varphi_2$  і напруги  $\underline{U}_2$ , з іншої – рівняннями напруг і струмів для первинної і вторинної обмоток трансформатора.

У розглянутому випадку після проведення вектора  $\underline{I}'_2$  під заданим кутом  $\varphi_2$  до нього будують вектор  $\underline{U}'_2$ . Далі до вектора напруги  $\underline{U}'_2$  додають вектори  $R'_2 \underline{I}'_2$ ,  $jX'_2 \underline{I}'_2$  і отримують результуючий вектор  $\underline{E}'_2$ . Далі під кутом  $90^\circ$  в напрямі відставання проводять вектор магнітного потоку  $\underline{\Phi}_m$  і вектор струму холостого ходу  $\underline{I}_x$ . Сума векторів струмів  $\underline{I}'_2 + \underline{I}_x = \underline{I}_1$ . До вектору  $\underline{E}_1$ , який за фазою співпадає з вектором  $\underline{E}_2$ , додають вектори  $R_1 \underline{I}_1$  і  $jX_1 \underline{I}_1$ , у результаті отримують вектор  $\underline{U}_1$ .

Схему заміщення трансформатора будують для приведеного трансформатора також на базі його рівнянь.

Можливість представлення трансформатора його схемою заміщення впливає з теорії чотириполюсника, оскільки трансформатор можна розглядати як чотириполюсник. Подібна ж схема заміщення використовується і в теорії асинхронних машин внаслідок існування деякої аналогії між процесами у асинхронній машині і трансформаторі. Використання схеми заміщення означає, що замість реального об'єкту – електричної машини – розглядається електрична схема, яка його заміщує. Співвідношення у реальному об'єкті (електричній машині) і аналогу (схеми заміщення) описуються рівняннями однакового виду. У той же час схема заміщення значно простіше і наочніше, ніж сама електрична машина.



Окрім повної схеми заміщення користуються  $\Gamma$ -подібною і спрощеною схемою заміщення.

Досліди холостого ходу і короткого замикання дають змогу знайти втрати у трансформаторі

Так, із дослідів ХХ знаходять коефіцієнт трансформації  $n = U_{1н} / U_{2н}$  – для понижувального трансформатора і  $n = U_{2н} / U_{1н}$  – для підвищувального трансформатора, потужність втрат холостого ходу  $P_x$ , яка дорівнює потужності втрат в магнітопроводі (магнітним втратам  $\Delta P_m$ ), параметри вітки холостого ходу ( $I_x = I_{1х}$ ,  $Z_0 = U_{1н} / U_{1х}$ ,  $R_0 = P_x / I_{1х}^2$ ,  $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ ).

З дослідів короткого замикання знаходять потужність електричних втрат в номінальному режимі, повний опір спрощеної схеми заміщення  $Z_k = U_{1к} / I_{1н}$ , активний опір  $R_k = R_1 + R_2' = P_k / I_{1н}^2$  і реактивний опір  $X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$  обмоток трансформатора, напругу короткого замикання  $u_k \% = (Z_k I_{1н} / U_{1н}) \cdot 100\%$ , активну  $u_{к.а} \% = (R_k I_{1н} / U_{1н}) \cdot 100\%$  і реактивну  $u_{к.р} \% = (X_k I_{1н} / U_{1н}) \cdot 100\%$  складові напруги короткого замикання:  

$$u_k \% = \sqrt{(u_{к.а} \%)^2 + (u_{к.р} \%)^2}.$$

Зміну вторинної напруги розраховують за формулою

$$\Delta u = \beta (u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_k) = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k),$$

де  $\beta = I_2 / I_{2н} = I_1 / I_{1н}$  – коефіцієнт навантаження;  $\varphi_2$  – кут зсуву фаз між напругою і струмом у навантаженні;  $\varphi_k$  – кут зсуву фаз у досліді короткого замикання.

ККД трансформатора визначають за формулою

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{к.н} + P_x},$$

де  $S_n$  – номінальна потужність трансформатора.

У трифазних трансформаторах алгебраїчна сума миттєвих синусоїдальних магнітних потоків в осерді дорівнює нулю, тому необхідність у «нейтральному» стрижні відпадає і трифазний трансформатор виготовляють у вигляді три стрижневого.

Під номінальними даними трифазних трансформаторів розуміють повну номінальну потужність трьох фаз:  $S_n = \sqrt{3} U_{1н} I_{1н} = \sqrt{3} U_{2н} I_{2н}$ , де  $U_{1н}$ ,  $U_{2н}$  – номінальні лінійні напруги;  $I_{1н}$ ,  $I_{2н}$  – номінальні лінійні струми; потужність втрат холостого ходу і короткого замикання на три фази  $P_x$ ,  $P_k$ ; номінальний

ККД  $\eta_n$ , який задається при активному навантаженні ( $\cos \varphi_2 = 1$ ) і при коефіцієнтах навантаження  $\beta = 1$ ,  $\beta = 0,5$ ; групи з'єднань обмоток трансформатора  $Y/Y_0-12$  або  $Y/\Delta-11$  (зірка–зірка з нейтральним проводом, група 12; зірка–трикутник, група 11).

Теорія трансформаторів повністю поширюється на автотрансформатори і вимірювальні трансформатори. При вивченні останніх слід звернути увагу на область застосування, особливості і додаткові похибки, що виникають).

## 1.2 Задача

Однофазний трансформатор характеризується наступними номінальними величинами: потужність  $S_n$ , висока (первинна) напруга  $U_{1n}$ , низька (вторинна) напруга  $U_{2n}$ . Потужність втрат холостого ходу  $P_0$  при  $U_1 = U_{1n}$ ; коефіцієнти потужності: при холостому ході  $\cos \varphi_{1x}$ , при короткому замиканні  $\cos \varphi_{1k}$ ; процентне значення напруги короткого замикання  $U_k = 5,5\%$ . Визначити: струм холостого ходу трансформатора; коефіцієнт трансформації; параметри повної схеми заміщення трансформатора; напругу  $U_2$ , якщо до трансформатора під'єднано приймач енергії з параметрами  $Z_n$ ,  $\cos \varphi_n$ . Накреслити схему заміщення трансформатора і нанести на ній параметри усіх елементів схеми.

Вказівки: 1. Прийняти, що у досліді холостого ходу реактивний опір обмотки малий у порівнянні з реактивним опором вітки намагнічування. 2. Прийняти, що у досліді короткого замикання потужність втрат ділиться порівну між первинною і вторинною обмотками.

Таблиця 1.1.- Вихідні дані для розв'язання задачі

№ варіанту	$S_n$ , кВА	$U_{1n}$ , кВ	$U_{2n}$ , В	$\cos \varphi_{1x}$	$\cos \varphi_{1k}$	$P_0$ , Вт	$Z_n$ , Ом	$\cos \varphi_n$
1	20	10	400	0,12	0,55	220	10	0,8
2	30	10	400	0,11	0,52	250	10	0,9
3	50	6	525	0,1	0,48	350	15	0,8
4	100	6	525	0,092	0,435	600	4	0,8
5	180	10	525	0,095	0,415	1200	2	0,6
6	320	6	525	0,083	0,345	1600	2	0,6
7	360	6	525	0,075	0,291	2500	1	0,8
8	750	10	400	0,091	0,29	4100	1	0,7
9	1000	10	400	0,098	0,272	4900	0,5	0,7
10	1800	10	400	0,099	0,241	8000	0,5	0,7

## Приклад розв'язання задачі

Таблиця 1.2 – Вихідні дані для однофазного трансформатора

$S_H$ , кВА	$U_K$ , %	$U_{1H}$ , кВ	$U_{2H}$ , В	$\cos \varphi_{1x}$	$\cos \varphi_{1k}$	$P_0$ , Вт	$Z_H$ , Ом	$\cos \varphi_H$
20	5,5	10	400	0,12	0,55	220	10	0,8

Знайти  $I_{1x}$ ,  $K_T$ , параметри Т-схеми,  $U_2$  при  $Z_H$ ,  $\cos \varphi_H$

Порядок розв'язання

1. Визначаємо струм ХХ, використавши залежність  $P_0 = U_{1H} I_{1x} \cos \varphi_{1x}$

$$I_{1x} = \frac{P_0}{U_{1H} \cos \varphi_{1x}} = \frac{220}{10 \cdot 10^3 \cdot 0,12} = 0,183 \text{ А}.$$

2. Визначаємо коефіцієнт трансформації

$$K_T = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{10 \cdot 10^3}{400} = 25.$$

3. Визначення параметрів Т-схеми.

3.1. Параметри вітки намагнічування (з дослідів ХХ) визначаються як

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1x}} = \frac{10 \cdot 10^3}{0,183} = 54,6 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{1x}^2} = \frac{220}{0,183^2} = 6570 \text{ Ом},$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{54600^2 - 6570^2} = 54203 \text{ Ом}.$$

3.2. Параметри короткого замикання:

- напруга короткого замикання  $U_K = \frac{5,5}{100} U_{1H} = \frac{5,5}{100} \cdot 10 \cdot 10^3 = 550 \text{ В},$

- опори  $Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}} = \frac{550}{2} = 275 \text{ Ом}.$

Тут  $I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}} = \frac{20 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 2 \text{ А}, R_K = Z_K \cos \varphi_{1k} = 275 \cdot 0,55 = 151 \text{ Ом},$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{275^2 - 151^2} = 230 \text{ Ом}.$$

Тоді параметри приведенної схеми заміщення

$$R_1 \approx R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{151}{2} = 75,5 \text{ Ом}, X_1 \approx X_2' = \frac{X_K}{2} = \frac{230}{2} = 115 \text{ Ом}.$$

4. Визначаємо зміну втрат напруги при  $Z_2 = 10 \text{ Ом}$  та  $\cos \varphi_2 = 0,8$ :

- складові напруги КЗ

$$U_a = U_K \cos \varphi_{1k} = 5,5 \cdot 0,55 = 3,025\%, U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 3,025^2} = 4,6\%.$$

Або у вольтах

$$U_a = 550 \cdot 0,55 = 302 \text{ В}, U_p = \sqrt{550^2 - 302^2} = 460 \text{ В};$$

- номінальний воринний струм  $I_{2н} = \frac{S_n}{U_{2н}} = \frac{20 \cdot 10^3}{400} = 50 \text{ А};$

- номінальний опір навантаження:  $Z_n = \frac{U_{2н}}{I_{2н}} = \frac{400}{50} = 8 \text{ Ом};$

- коефіцієнт навантаження з урахуванням умови  $Z_n = 10 \text{ Ом},$

$$\beta = \frac{8}{10} = 0,8;$$

- тоді зміна вторинної напруги у %

$$\Delta U\% = \beta(U_a \cos \varphi_n + U_p \sin \varphi_n) = 0,8(3,02 \cdot 0,8 + 4,6 \cdot 0,6) = 4,14\%.$$

Або у вольтах  $\Delta U = U_{2н} \frac{4,14}{100} = 400 \cdot \frac{4,14}{100} = 16,56 \text{ В}.$  Напруга

$$U_2 = U_{2н} - \Delta U = 400 - 16,56 = 383,44 \text{ В}$$

5. Коефіцієнт навантаження  $\beta$  можна визначити більш точніше використавши спрощену схему заміщення з урахуванням того, що  $Z_0 \gg Z_k$ :

$$Z'_n = k^2 Z_n = 25^2 \cdot 10 = 6250 \text{ Ом},$$

$$R'_n = Z'_n \cos \varphi_n = 6250 \cdot 0,8 = 5000 \text{ Ом},$$

$$X'_n = Z'_n \sin \varphi_n = 6250 \cdot 0,6 = 3750 \text{ Ом}.$$

Це опори навантаження, які приведені до первинної обмотки. Тоді

$$I_1 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{(R_k + R'_n)^2 + (X_k + X'_n)^2}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{(151 + 5000)^2 + (230 + 3750)^2}} = 1,54 \text{ А},$$

$$\text{і } \beta = \frac{I_1}{I_{1н}} = \frac{1,54}{2} = 0,77.$$

Невелика помилка пояснюється тим, що при  $I_2 = I_{2н}$  напруга  $U_2$  буде дещо меншою за  $U_{2н}$ , яка у трансформатора відноситься до режиму ХХ.

### 1.3 Питання для самоперевірки

1. Зобразіть (схематично) однофазний трансформатор і поясніть принцип його роботи.

2. Виведіть вирази для діючих ЕРС, які наводяться у первинній і вторинній обмотках трансформатора основним магнітним потоком.
3. У чому полягає режим холостого ходу трансформатора ? Накресліть векторну діаграму режиму холостого ходу.
4. Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора ?
5. Чому на осерді трансформатора обмотки вищої і нижчої напруги розміщують на загальному стрижні ?
6. Напишіть рівняння ЕРС трансформатора.
7. Напишіть рівняння струмів трансформатора і поясніть фізичний зміст складових первинного струму.
8. У чому полягає розсіювання в трансформаторі ? Як виражається ЕРС розсіювання обмоток ?
9. Напишіть рівняння напруг (рівняння електричного стану) для первинної і вторинної обмоток і поясніть смисл кожного з членів цих рівнянь.
10. Що називають приведеними величинами вторинної обмотки ?
11. Накресліть схему заміщення трансформатора.
12. Накресліть векторні діаграми трансформатора для випадків його навантаження чисто активними і активно-індуктивними опорами.
13. Накресліть схему досліду холостого ходу трансформатора і поясніть, які величини визначаються у цьому досліді.
14. Чому у досліді холостого ходу потужність втрат у міді є настільки малою, що нею можна знехтувати ?
15. Накресліть схему досліду короткого замикання трансформатора і поясніть, які величини визначаються у цьому досліді.
16. Чому у досліді короткого замикання потужність втрат в сталі є настільки малою, що нею можна знехтувати ?
17. Сформулюйте визначення напруги короткого замикання, назвіть його наближене значення.
18. Виведіть вираз для відсоткової зміни напруги трансформатора.
19. Напишіть загальний вираз для ККД трансформатора з врахуванням відносного значення вторинного струму (з врахуванням коефіцієнта навантаження).
20. Як відбувається трансформування трифазного кола ?
21. Накресліть схему автотрансформатора – однофазного і трифазного. Які переваги і недоліки автотрансформатора ?
22. Накресліть принципову схему трансформаторів напруги і струму.
23. Які помилки виникають при використанні трансформаторів напруги і струму для вимірювання напруги і струму ?
24. Зобразіть умовно-логічну схему і поясніть за нею принцип роботи трансформатора.

## ТЕМА 2 ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

**Мета** – оволодіння знаннями з принципу дії трифазного асинхронного двигуна та розрахунку основних параметрів.

**Завдання:** ознайомитись з принципом роботи трифазного асинхронного двигуна, вивчити основні розрахункові залежності, особливості роботи трифазного асинхронного двигуна, навчитись розраховувати номінальний струм у фазі обмотки статора, кількість пар полюсів обмотки статора, номінальне ковзання, номінальний момент на валу ротора, критичний момент, критичне ковзання.

### 2.1 Теоретичні відомості.

Розбір принципу роботи асинхронного двигуна слід проводити за умовно-логічною схемою, показаною на рис. 2.1.

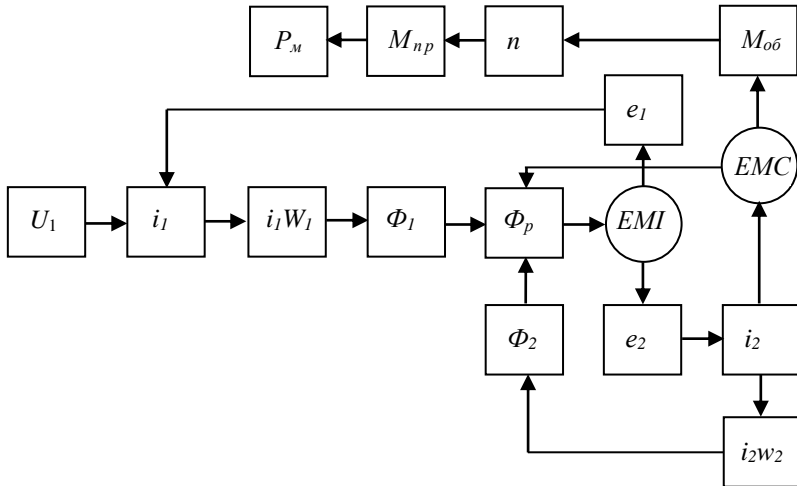


Рис. 2.1 – Умовно-логічна схема роботи асинхронного двигуна

Обмотка статора живиться від трифазної симетричної системи напругою  $U_1$ . Оскільки обмотки статора є замкнуті, у них тече струм  $i_1$ . Ці обмотки мають  $w_1$  витків, у результаті створюються МРС  $i_1 w_1$ , які утворюють обертове магнітне поле  $\Phi_1$ . (обмотки статора зсунуті в просторі відносно один одного на  $120^\circ$ ). У відповідності до закону електромагнітної індукції (ЕМІ) в обмотках статора і ротора наводяться ЕРС  $e_1$  і  $e_2$ . Коло обмотки ротора є замкнутим, тому у ньому тече струм  $i_2$ , значення якого залежить від навантаження. В результаті взаємодії струму в обмотці ротора  $i_2$  з магнітним потоком  $\Phi_p$  у відповідності з законом Ампера на валу двигуна виникає обертальний момент. Так, як і в

трансформаторі, має місце вплив струм навантаження  $i_2$  на струм статора  $i_1$  і МРС  $i_2 w_2$  на магнітний потік  $\Phi$ .

Частота обертання  $n_1 = 60 f_1 / p$  магнітного поля  $\Phi_p$  більша за частоту обертання  $n_2$  ротора. Відносна різниця цих частот  $s = (n_1 - n_2) / n_1$  називається ковзанням. При номінальному навантаженні  $s_n = 0,02 \div 0,08$ .

Необхідно засвоїти зв'язок між ЕРС, частотою струму і індуктивним опором нерухомого ротора і ротора, що обертається, тобто  $E_{2s} = sE_2$ ,  $f_2 = sf_1$  і  $X_{2s} = sX_2$ , при пускові двигуна у хід, оскільки в перший момент пуску ротор знаходиться у нерухомому стані і  $s = 1$ .

Струм однієї фази трифазного асинхронного двигуна визначають за формулою

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2'/s)^2}},$$

А обертальний момент – за формулою

$$M = \frac{3pU_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_1 s \left[ (R_2'/s)^2 + (X_2')^2 \right]},$$

де  $R_1$ ,  $X_1$  – активний і реактивний опір однієї фази обмотки статора;  $R_2'$ ,  $X_2'$  – приведені активний і реактивний опір однієї фази ротора;  $U_{1\phi}$  – фазна напруга обмотки статора;  $p$  – кількість пар полюсів обертового магнітного поля;  $s$  – ковзання;  $\omega$  – кутова частота напруги мережі.

Обертовий момент може бути також визначений за спрощеною формулою

$$M = \frac{2M_\kappa}{s_\kappa/s + s/s_\kappa},$$

де  $M_\kappa$  – критичний момент;  $s_\kappa$  – ковзання при критичному моменті.

Механічна характеристика  $n(M)$  асинхронного двигуна може бути побудована за формулами моменту з врахуванням, що  $n_2 = n_1(1-s)$ . За нормальної роботи асинхронного двигуна і невеликих ковзаннях ( $0 \leq s \leq s_n$ ) залежність  $n(M)$  наближається до прямолінійної 1 (рис. 2.2) і виражається рівнянням  $n = n_x - \alpha M$ , де  $\alpha$  – постійна величина.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, як правило, пускаються у хід прямим увімкненням в мережу без застосування спеціальних пускових пристроїв. Потужності енергетичних мереж, від яких живляться мережі промислових підприємств, настільки великі, що стрибки струму, які відбуваються при пуску двигунів навіть великої потужності (біля 300 кВт) несуттєво впливають на режим цих мереж. Гарні пускові властивості асинхронних двигунів пояснюються тим, що при пуску в хід опір ротора є значно більшим, ніж при нормальній роботі. Потрібно розібратись у причині такого явища.

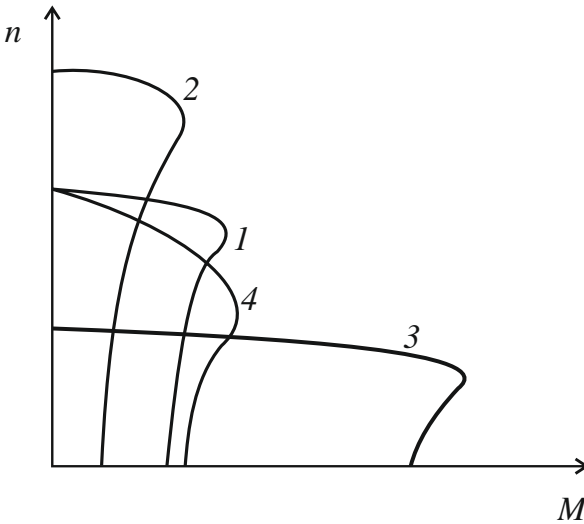


Рис. 2.2 – Механічні характеристики асинхронного двигуна

Одним із недоліків асинхронних двигунів є складність регулювання частоти обертання. Частота обертання  $n_2$  визначається формулою  $n_2 = 60f_1(1-s)/p$ , з якої слідує, що величину  $n_2$  можна змінювати зміною ковзання  $s$  за рахунок зміни опору кола ротора або статора.

Вивчаючи способи регулювання частоти обертання ротора, необхідно чітко уявляти собі вид механічних характеристик, які відповідають різним

способам регулювання.

На рис. 2.2 зображені наступні характеристики: 1 – звичайна характеристика, відносно якої розглядаються характеристики 2, 3 і 4; 2 – характеристика, яка відповідає збільшенню частоти напруги у мережі живлення; 3 – характеристика, яка відповідає подвоєнню числа пар полюсів статора; 4 – характеристика, яка відповідає збільшенню опору кола ротора, що викликає збільшення ковзання. Зміна критичного обертового моменту на характеристиках 2 і 3 обумовлене тим, що регулювання частоти обертання передбачається при постійній потужності двигуна.

Якщо записати рівняння балансу потужності ротора у вигляді  $P_{en} = P_2 + \Delta P_2$ , де  $P_{en}$  – електромагнітна потужність,  $P_2$  – потужність на валу двигуна,  $\Delta P_2$  – потужність втрат ротора, то для схеми заміщення асинхронного



двигуна на основі другого закону Кірхгофа отримаємо  $\underline{E}_{2\phi}' = \underline{Z}_{2\phi}' I_2' + R_2' I_2' \frac{1-s}{s}$ ; після множення обох частин рівняння на струм  $I_2'$  знайдемо рівняння балансу потужності схеми заміщення, тобто  $\underline{E}_{2\phi}' I_2' = \underline{Z}_{2\phi}' I_2'^2 + R_2' I_2'^2 \frac{1-s}{s}$ . Порівнюючи отримані доданки, видно, що доданок  $R_2' I_2'^2 \frac{1-s}{s}$  є аналогом механічної потужності  $P_2$ .

## 2.2 Задача

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором живиться від мережі з лінійною напругою 380 В. Величини, які характеризують номінальний режим двигуна: потужність на валу  $P_{2н}$ , кВт, частота обертання ротора  $n_{2н}$ , об/хв, коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_n$ , ККД  $\eta_n$ . Обмотки фаз статора з'єднані зіркою. Кратність критичного моменту відносно номінального  $K_m = M_K / M_n$ . Визначити: а) номінальний струм у фазі обмотки статора, б) кількість пар полюсів обмотки статора; в) номінальне ковзання; г) номінальний момент на валу ротора; д) критичний момент; е) критичне ковзання (користуючись формулою  $M = 2M_{кр} \left( \frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} \right)^{-1}$ ; ж) значення моментів, які відповідають значенням ковзання:  $S_n, S_K, 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0$  (за формулою п.е.). 3. Пусковий момент при зниженні напруги у мережі на 10%. Побудувати механічну характеристику  $n(M)$  електродвигуна.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розв'язання задачі

№ варіанту	Дані до задачі				
	$P_{2н}$ , кВт	$n_{2н}$ , об/хв	$\cos \varphi_{1н}$	$\eta_n$ , %	$K_m$
1	1,1	2800	0,87	79,5	2,2
2	1,5	2825	0,88	80,5	2,2
3	2,2	2850	0,89	83,0	2,2
4	3,0	1430	0,84	83,5	2,2
5	4,0	1430	0,85	86,0	2,2
6	5,5	1440	0,86	88,0	2,2
7	7,5	1440	0,87	88,5	2,2
8	10	960	0,89	88,0	1,8
9	13	960	0,89	88,0	1,8
10	17	960	0,90	90,0	1,8

## Приклад розв'язання задачі

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для трифазного асинхронного двигуна

$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$\cos \varphi_{1n}$	$\eta_n$ , %	$K_m$	$U_n$ , В
10	960	0,89	88	1,8	380

1. Визначаємо струм  $I_n$  :

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_H, \text{ звідси}$$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_H \eta_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,88} = 19,42 \text{ А}$$

2. Частота обертання магнітного поля при  $n_n = 960$  об/хв :

$$n_0 = 1000 \text{ об/хв}$$

3. Кількість пар полюсів

$$p = \frac{60f}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3$$

4. Номінальний момент

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \frac{n_n}{60}} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 30}{\pi \cdot 960} = 99,52 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Номінальне ковзання

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04 \text{ (4\%)}$$

6. Критичний момент

$$M_{кр} = K_m M_n = 1,8 \cdot 99,52 = 179 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Критичне ковзання визначаємо з формули  $M = 2M_{кр} \left( \frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} \right)^{-1}$

підстановкою

$$\left. \begin{array}{l} M = M_n \\ S = S_n \end{array} \right\} \rightarrow S_{кр} = \left( K_m + \sqrt{K_m^2 - 1} \right) S_n = \left( 1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) 0,04 = 0,132 \text{ (13,2\%)}$$

8. Розраховуємо момент двигуна при різних значеннях S за формулою

$$M = 2M_{кр} \left( \frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} \right)^{-1} = 2 \cdot 179 \left( \frac{S}{0,132} + \frac{0,132}{S} \right)^{-1}.$$

Таблиця 2. – Розраховані значення параметрів двигуна

$S$	$S_n$	0,1	$S_{кр} = 0,132$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$M, \text{Нм}$	99,5	172,3	179,0	164,0	106,5	75,0	57,5	$M_n = 46,5$
$n, \text{об/хв}$	960	900	868	800	600	400	200	0

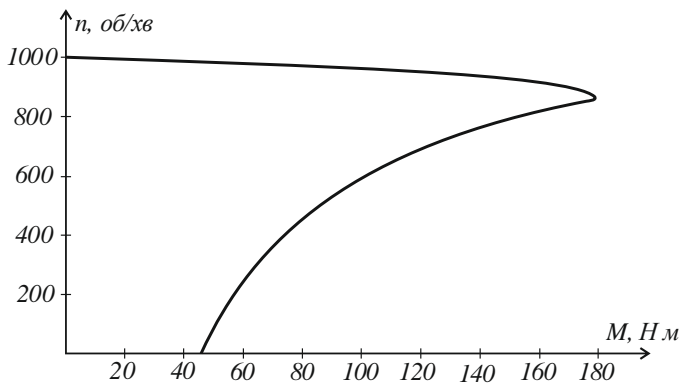


Рис. 2.3 – Залежність  $n(M)$

9. З урахуванням того, що  $M \equiv U_1^2$ , то при зниженні напруги на 10%

$$M_n = 46,5 \cdot 0,9^2 = 37,66 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

10. Зауважимо, що  $M_n < M_n$ . Це означає, що двигун необхідно вмикати без навантаження, а приєднувати його лише після розгону.

### 2.3 Питання для самоперевірки

1. Зобразіть схематичне улаштування асинхронної машини.
2. Як відбувається збудження обертового магнітного поля трифазною системою струмів ?
3. Поясніть принцип роботи асинхронного двигуна за умовно-логічною схемою.
4. Що називається ковзанням в асинхронному двигуні ?
5. Як залежить частота обертання обертового магнітного поля від частоти напруги живлення мережі і конструкції обмотки статора ? Яка максимальна частота обертання ротора можлива при частоті в мережі 50 Гц ?
6. Як здійснити зміну напрямку обертання ротора двигуна ?

7. Чому дорівнює частота ЕРС в роторі, якщо частота в мережі дорівнює 50 Гц, а ковзання складає 2% ?

8. За яких умов асинхронна машина працює у режимі: а) генератора; б) електромагнітного гальма ?

9. Напишіть вираз для ЕРС, що наводиться у нерухомому і обертовому роторах ?

10. Напишіть рівняння магніторухомих сил і струмів.

11. Виведіть вираз для струмів у роторі, який обертається.

12. Накресліть векторну діаграму асинхронного двигуна.

13. У чому полягає аналогія між асинхронним двигуном і трансформатором ?

14. Виведіть вираз для обертового моменту двигуна. Накресліть криву  $M(s)$ .

15. Чому при збільшенні ковзання від 0 до  $s_k$  обертовий момент збільшується, а при подальшому збільшенні ковзання від  $s_k$  до 1 – зменшується ?

16. Яка частина кривої  $M(s)$  відповідає стійкій роботі двигуна і яка – нестійкій ?

17. Що називається механічною характеристикою електродвигуна ? Накресліть природню механічну характеристику асинхронного двигуна.

18. Як впливає значення опору кола ротора на пускові властивості асинхронного двигуна ?

19. Які існують шляхи зниження пускового струму в асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором ?

20. наведіть можливі способи регулювання частоти обертання асинхронного двигуна.

21. Як здійснюється зміна числа пар полюсів обмотки статора асинхронного двигуна ?

22. Накресліть штучну механічну характеристику асинхронного двигуна з фазним ротором при регулюванні частоти обертання шляхом увімкнення реостата у коло ротора.

23. Накресліть штучні механічні характеристики двигуна при регулюванні частоти обертання зміною частоти напруги живлення.

24. Накресліть штучні механічні характеристики двигуна при регулюванні частоти обертання шляхом зміни кількості пар полюсів.

25. Яким чином асинхронна машина може бути використана для регулювання напруги ?

26. Складіть умовно-логічну схему асинхронного двигуна і поясніть за нею принцип його роботи.

### ТЕМА 3. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета** – оволодіння знаннями з принципу дії машини постійного струму та розрахунку її основних параметрів.

**Завдання:** ознайомитись з принципом роботи машин постійного струму, вивчити основні розрахункові залежності, особливості роботи машини постійного струму, навчитись розраховувати номінальний момент на валу електродвигуна, струм, споживаний від мережі, струми у колах збудження і якоря при номінальному навантаженні, опори кола якоря і кола збудження, потужність механічних і магнітних втрат ККД

#### 3.1 Теоретичні відомості

При вивченні теми перш за все необхідно засвоїти принцип дії генератора і двигуна постійного струму, попередньо повторивши з курсу фізики закон електромагнітної індукції (ЕМІ) і закон електромагнітної сили (ЕМС) – закон Ампера. Варто добре усвідомити принцип оборотності та його застосування в машині постійного струму, звернувши увагу на роль оберտального і протидіючого моментів, напруги і ЕРС машини.

Принцип роботи генератора постійного струму доцільно пояснювати з використанням умовно-логічної схеми, представленної на рис. 3.1.

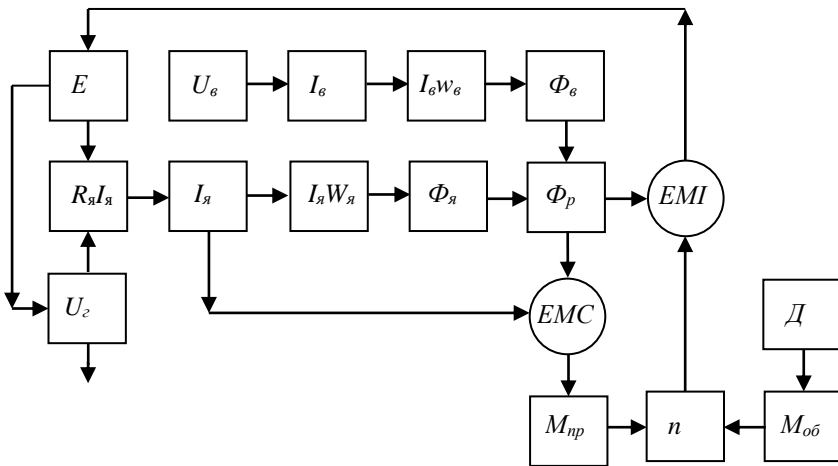


Рис. 3.1 – Умовно-логічна схема роботи генератора постійного струму

Первинний двигун Д розвиває обертальний момент  $M_{об}$ , обертаючи ротор генератора з частотою  $n$ . Якщо до обмотки збудження підведена напруга  $U_{\epsilon}$ , то у ній виникне струм  $I_{\epsilon}$ , що створює МРС  $I_{\epsilon} W_{\epsilon}$  збуджує в машині магнітний потік збудження  $\Phi_{\epsilon}$ . При обертанні провідників якоря у магнітному полі машини в них за законом електромагнітної індукції наводиться ЕРС  $E$ , під

дією якої по колу якоря і навантаження, якщо вона є замкненою, почне проходити струм, який створює у якорі падіння напруги  $R_{я}I_{я}$ . Величини  $E$ ,  $U_c$  і  $R_{я}I_{я}$  пов'язані співвідношенням  $U_c = E - R_{я}I_{я}$ . Струм якоря створює МРС  $I_{я}w_{я}$ , яка викликає появу у генераторі магнітного потоку реакції якоря  $\Phi_{я}$ . Результуючий магнітний потік  $\bar{\Phi}_p = \bar{\Phi}_e + \bar{\Phi}_{я}$ . У відповідності до закону електромагнітної сили взаємодія струму якоря  $I_{я}$  і магнітного потоку  $\Phi_p$  створює силу і момент протидії  $M_{np}$ . В усталеному режимі  $M_{ep} = M_{np}$ .

Основними величинами, які характеризують роботу генератора постійного струму, є: потужність, що виробляється  $P = U_c I$ , напруга на затискачах  $U_c$ , струм збудження  $I_e$ , струм якоря  $I_{я}$  або струм навантаження  $I$ , частота обертання  $n$  (зазвичай  $n = \text{const}$ ). Залежність між цими величинами описується двома рівняннями:

- рівняння ЕРС

$$E = c_E n \Phi$$

- рівняння електричного стану кола якоря

$$U_c = E - R_{я} I_{я}.$$

Останнє рівняння, яке визначає напругу на затискачах генератора, передбачає, що напруги ЕРС і струму в якорі генератора співпадають.

Важливо знати електричні схеми генераторів при різноманітних способах увімкнення обмотки збудження і вплив способу увімкнення на характеристики генератора.

Принцип роботи двигуна постійного струму зручно пояснити за допомогою умовно-логічної схеми, представленої на рис. 6. Якщо до двигуна підведено напругу  $U_c$ , то у колі збудження виникає струм  $I_e$ , а у колі якоря – струм  $I_{я}$ . Струм збудження викликає МРС  $I_e w_e$ , яка збуджує у машині магнітний потік  $\Phi_e$ . Струм якоря, у свою чергу, збуджує магнітний потік реакції якоря  $\Phi_{я}$ . Результуючий магнітний потік  $\bar{\Phi}_p = \bar{\Phi}_e + \bar{\Phi}_{я}$ . У колі якоря струм  $I_{я}$  створює падіння напруги  $R_{я}I_{я}$ . У відповідності до закону електромагнітної сили при взаємодії струму  $I_{я}$  і магнітного потоку  $\Phi_p$  створюється обертальний момент  $M_{об}$ . В усталеному режимі  $M_{об} = M_{np}$ . Коли провідники якоря перетинають магнітне поле  $\Phi_p$ , у них у відповідності із законом електромагнітної індукції наводиться ЕРС, яка направлена проти напруги мережі. Величини  $E$ ,  $U_c$  і  $R_{я}I_{я}$  пов'язані співвідношенням  $U_c = E + R_{я}I_{я}$ .

Основні величини, які характеризують двигуни: механічна потужність на валу  $P_2$ , напруга  $U$ , споживаний струм  $I$ , струм якоря  $I_{я}$ , струм збудження

$I_e$ , частота обертання  $n$ , електромагнітний момент  $M_{em}$ . Залежності між цими величинами описуються рівняннями:

- електромагнітного моменту  $M_{em} = cMI_y \Phi$ ;
- електричного стану кола якоря  $U = E + R_y I_y$ ;
- противо-ЕРС  $E_{np} = cEn\Phi$ ;
- моментів  $M_{em} = M_{np} + M_{вт} + M_{дин}$ , де  $M_{np}$  – тормозний момент навалу, який створюється навантаженням;  $M_{вт}$  – момент втрат, який створюється усіма видами втрат у двигуні;  $M_{дин}$  – динамічний момент, який створюється інерційними силами.

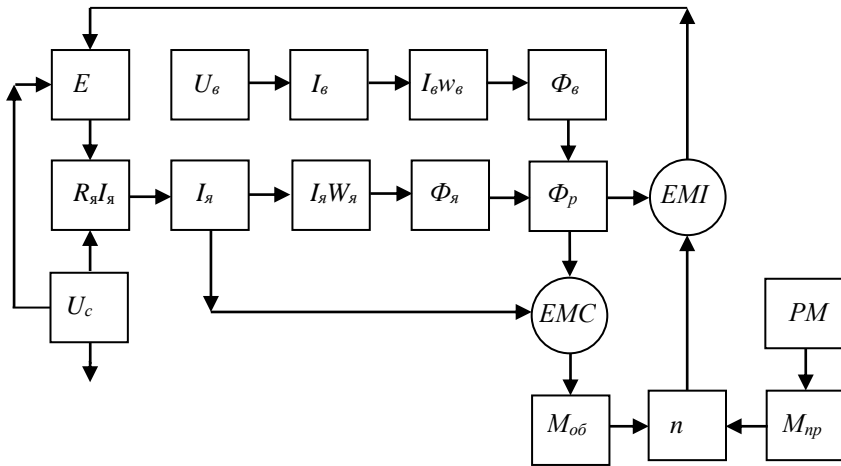


Рис. 3.2 – Умовно-логічна схема двигуна постійного струму

Найважливішою для двигуна є механічна характеристика  $n(M)$  – залежність частоти обертання  $n$  від моменту на валу. Вона відображає вплив механічного навантаження на валу двигуна на частоту обертання, що особливо важливо знати при виборі і експлуатації двигунів.

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними. Під природними розуміють характеристики, що знімаються за відсутності у схемі будь яких додаткових опорів, під штучними – за наявності таких опорів.

До пуску двигуна висуваються дві основні вимоги: забезпечити необхідний для зрушення з місця і розгону крутний момент, не допускати при пуску протікання через якорь занадто великого струму, який є небезпечний для двигуна. На практиці можливі три способу пуску: прямий пуск, пуск при увімкненні реостата у коло якоря і пуск при пониженої напрузі у колі якоря.

При прямому пуску коло якоря вмикається відразу на повну напругу. Оскільки у перший момент пуску якорь є нерухомим ( $n=0$ ), а противо-ЕРС є

відсутньою ( $E_{np} = cEn\Phi$ ). Тоді пусковий струм якоря  $I_{я,n} = U/R_{я}$ . Оскільки  $R_{я} = 0,02 + 1,10$  Ом, то  $I_{я,n} = (50 \div 100)I_n$ , що є недопустимим. Тому прямий пуск є можливим лише у двигунів малої потужності, де  $I_{я,n} \leq (4 \div 6)I_n$  і розгін двигуна триває менше 1 с.

При пуску двигуна з пусковим реостатом останній обмежує пусковий струм якоря. Те ж коло переслідує пуск при заниженій напрузі, але для його відтворення необхідний незалежне регульоване джерело живлення.

Характеристики двигуна постійного струму залежать від схеми увімкнення обмотки збудження по відношенню до обмотки якоря. Розрізняють двигуни з незалежним, паралельним, послідовним і змішаним увімкненням обмотки збудження. Усі ці схеми необхідно знати на пам'ять.

Особливу увагу слід звернути на механічні властивості двигунів постійного струму. Лише знаючи ці властивості, можна вирішити питання про придатність того чи іншого двигуна постійного струму для приводу певного механізму. Лише на основі цих властивостей стане зрозуміло, чому для приводу металорізального верстата застосовується двигун паралельного збудження, а для приводу підйомного механізму – двигун послідовного збудження.

Механічні властивості двигуна визначаються його механічною характеристикою, яка описується формулою

$$n = \frac{U}{cE\Phi} - \frac{R_{я}}{cE\Phi^2} M$$

В залежності від схеми увімкнення обмотки збудження ця формула набуває того чи іншого виду.

Двигун постійного струму з паралельним збудженням має жорстку механічну характеристику, яка описується рівнянням  $n = n_x - bM$ , де  $b$  – постійна величина. Це рівняння відповідає припущенню, що магнітний потік залишається незмінним при різних навантаженнях. Проте при збільшенні навантаження внаслідок реакції якоря магнітний потік зменшується. Тому механічну характеристику цього двигуна можна вважати прямолінійною, якщо реакцією якоря можна знехтувати зважаючи на її малу величину, або якщо реакція якоря компенсується.

Двигун послідовного збудження характеризується м'якою механічною характеристикою. Якщо зробити припущення, що магнітний потік пропорційний струму, то рівняння механічної характеристики буде мати вигляд  $n = A/\sqrt{M - D}$ , де  $A$  і  $D$  – постійні величини, які не залежать від навантаження.

Оскільки двигун постійного струму допускає плавне регулювання частоти обертання, виникає питання про діапазон регулювання. Широкий діапазон дозволив би використовувати двигун без застосування редуктора, що не лише спростило б передачу, але і покращило б роботу привідного механізму. Проте можливість розширення діапазону регулювання є обмеженою, оскільки



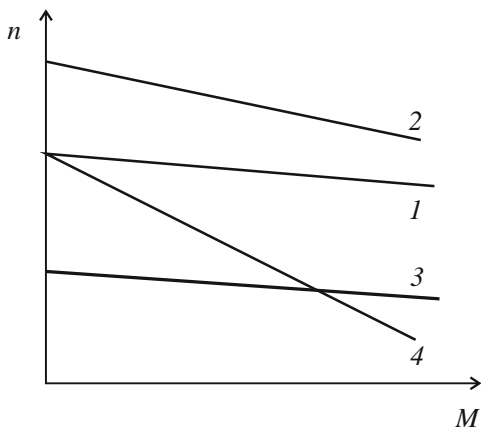


Рис. 3.3 – Механічні характеристики двигуна постійного струму

збільшення частоти обертання призводить до погіршення умов комутації, а її зменшення викликає збільшення розмірів двигуна і, як наслідок – здороження. Тому зазвичай  $n_{\max}/n_{\min} = 2 \div 3$ .

Вид механічної характеристик двигуна постійного струму з паралельним збудженням при різноманітних способах регулювання частоти обертання показаний на рис. 1. Тут 1 – природня характеристика, 2 – характеристика при увімкненні реостата в коло обмотки збудження, 3 – характеристика при

зменшенні напруги, 4 – характеристика при увімкненні реостата в коло якоря.

### 3.2 Задачі

**Задача 1.** Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням виконаний на номінальну напругу  $U_n = 220$  В. Дані номінального режиму електродвигуна: потужність  $P_n$ , частота обертання якоря  $n_n$ , ККД  $\eta_n$ . Струм у колі збудження складає  $I_{зб}$  % від номінального струму електродвигуна. Потужність втрат у колі якоря при номінальному навантаженні складає 50% від сумарної потужності втрат в електродвигуні.

Визначити: а) номінальний момент на валу електродвигуна; б) струм  $I_n$ , споживаний електродвигуном від мережі, при номінальному навантаженні; струми у колах збудження і якоря при номінальному навантаженні, г) опори кола якоря і кола збудження; д) потужність механічних і магнітних втрат (приймаючи її як незалежну від навантаження); е) сумарну потужність втрат і ККД електродвигуна при значеннях струму 0,25; 0,5; 0,75; і 1,25  $I_n$ ; ж) момент на валу і частоту обертання якоря при тих же значеннях струму. Побудувати у загальній системі координатних осей криві  $M(I_j)$ ,  $n(I_j)$ ,  $\eta(I_j)$ , де  $M(I_j)$  - струм у колі якоря (відповідно до значень навантаження, вказаним вище).

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розв’язання задачі

№ варіанту	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$\eta_n$ , %	$I_{зб}$ , %
1	2,2	3000	80	3
2	3,2	3000	83	3

3	4,5	3000	84	3
4	6	3000	82	3
5	8	3000	83,5	3
6	14	1500	86,5	4
7	19	1500	83,7	2
8	25	1500	85,5	2
9	32	1500	83,9	2
10	42	1500	87,2	2

### Приклад розв'язання задачі

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для двигуна з паралельним збудженням

$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$\eta_n$ , %	$I_{зб}$ , %	$P_{я}$
220	8	3000	83,5	3% · $I_n$	50% · $\sum \Delta P$

1. Номінальний момент

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \frac{n_n}{60}} = \frac{30 \cdot 8 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 3000} = 25,47 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2. Вхідна потужність

$$P_{1n} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{8 \cdot 10^3}{0,835} = 9,58 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

3. Номінальний струм

$$I_n = \frac{P_{1n}}{U_n} = \frac{9,58 \cdot 10^3}{220} = 43,5 \text{ А}$$

4. Струм обмотки збудження

$$I_{зб} = \frac{3}{100} I_n = \frac{3}{100} \cdot 43,5 = 1,3 \text{ А}$$

5. Номінальний струм якоря

$$I_{ян} = I_n - I_{зб} = 43,5 - 1,3 = 42,2 \text{ А}$$

6. Сумарні втрати

$$\Delta P = P_1 - P_n = 9,58 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3 = 1,58 \cdot 10^3 = 1580 \text{ Вт}$$

7. Втрати в якорі:

$$\Delta P_{\text{я}} = 0,5 \cdot \Delta P = 0,5 \cdot 1580 = 790 \text{ Вт}$$

8. Опір:

$$R_{\text{я}} = \frac{\Delta P_{\text{я}}}{I_{\text{я}}^2} = \frac{790}{42,2^2} = 0,44 \text{ Ом}$$

9. Опір:

$$R_{\text{зб}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{зб}}} = \frac{220}{1,3} = 169,23 \text{ Ом}$$

10. Постійні втрати потужності

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} = \Delta P - \Delta P_{\text{я}} - \Delta P_{\text{зб}} = 1580 - 790 - 220 \cdot 1,3 = 504 \text{ Вт.}$$

Але  $\Delta P_{\text{зб}}$  можна також віднести до постійних втрат, оскільки при  $U = U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$   $\Delta P_{\text{зб}} = U_{\text{н}} I_{\text{зб}} = 220 \cdot 1,3 = 286 \text{ Вт} = \text{const}$ . Тоді постійні втрати, які не залежать від навантаження  $\Delta P_{\text{пост}} = \frac{1}{2} \Delta P = 790 \text{ Вт}$ .

11. ККД двигуна визначається за формулою

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{U_{\text{н}} I_{\text{я}}}, \text{ де } \Delta P = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{зб}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + \text{const}$$

$$\text{Частота обертання } n = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi}, \text{ де}$$

$$C_e \cdot \Phi = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}}{n_{\text{н}}} = \frac{220 - 42,2 \cdot 0,44}{3000} = 0,067$$

Для номінального режиму.

$$\text{Тоді } n = \frac{220 - I_{\text{я}} \cdot 0,44}{0,067}. \text{ Графік залежності – рівняння прямої.}$$

Момент двигуна:

$$M = C_m \Phi I_{\text{я}}, \text{ де } C_m \Phi = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}} = \frac{25,47}{42,2} = 0,6$$

Тоді  $M = 0,60 \cdot I_{\text{я}}$  – рівняння прямої.

У табл. 3.3 наведені результати розрахунків для різних значень струму двигуна: 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25  $I_{\text{н}}$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків

$I, \text{ А}$	10,88	21,75	36,63	43,50	54,38
----------------	-------	-------	-------	-------	-------

$I_{я}, A$	9,58	20,45	35,33	42,2	53,08
$I_{я}^2 R_{я}, Вт$	40	184	549	790	1240
$\Delta P_{const}, Вт$	790	790	790	790	790
$\Delta P, Вт$	830	974	1339	1580	2030
$\eta$	0,653	0,792	0,830	0,835	0,830
$n_n, об/хв$	3220	3149	3052	3000	2935
$M, Н \cdot м$	5,75	12,27	21,20	25,47	31,85

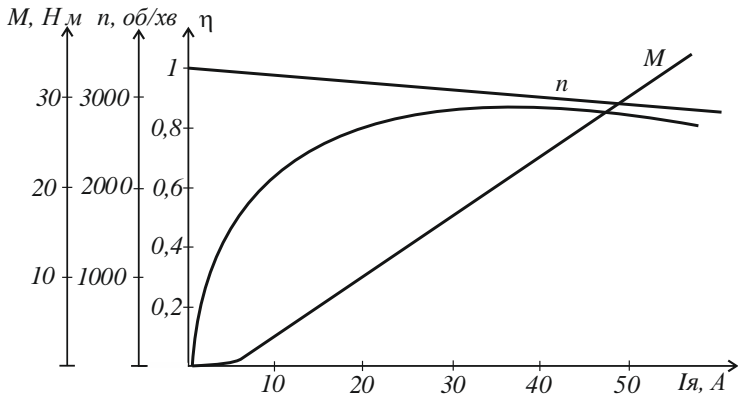


Рис. 3.4 – Графічні залежності параметрів двигуна

Прямую будують за двома точками. При ХХ  $I_{я} = 0$  ,  
 $n_0 = \frac{220}{0,067} = 3284$  об/хв . Друга точка  $I_{я} = I_{ян}$  ,  $n_n = 3000$  об/хв .

Для побудови залежності  $M(I_{я})$  потрібно дві точки:

$$I_{я} = 0 ; M = 0.$$

$$I_{я} = I_{ян} ; M = M_n$$

**Задача 2.** Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням характеризується наступними номінальними величинами: напруга  $U_n$  ; потужність на валу  $P_n$  ; частота обертання якоря  $n_n$  ; ККД  $\eta_n$  ; опір кола якоря  $R_{я}$  ; опір кола збудження  $R_{зб}$  . Визначити: а) частоту обертання якоря при холостому ході; б) частоту обертання якоря при номінальному моменті на валу двигуна і увімкненні у коло якоря додаткового опору, що дорівнює  $3R_{я}$  . Побудувати звичайну і реостатну механічні характеристики  $n(M)$  електродвигуна. Реакцію якоря і струмом холостого ходу знехтувати.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані до задачі

№ варіанту	$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$\eta_n$ , %	$R_я$ , Ом	$R_{зб}$ , Ом
1	110	1,0	3000	77	1,2	220
2	110	1,5	3000	76	0,8	160
3	110	2,2	3000	80	0,48	110
4	110	3,2	3000	78,5	0,34	80
5	110	4,5	1500	80	0,23	70
6	220	6	1500	82,5	0,62	220
7	220	8	3000	83,5	0,44	110
8	220	11	1500	84	0,31	185
9	220	14	1500	86,5	0,21	135
10	220	19	1500	84,5	0,16	110

### Приклад розв'язання задачі

3.5. Дані електричного двигуна з паралельним збудженням подані у таблиці

Таблиця 3.5 – Вихідні дані для двигуна з паралельним збудженням

$U_n$ , В	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$\eta_n$ , %	$R_я$ , Ом	$R_{зб}$ , Ом
110	1 кВт	3000	77	1,2	220

Знайти  $I_n$ ,  $M_n$ ,  $M_{\Pi}$ ,  $I_{\Pi}$  схеми,  $n$  при  $R_с = 1,2R_{Вн}$

$$1. \quad I_n = \frac{P_{1n}}{U_n} = \frac{P_{2n}}{\eta_n U_n} = \frac{1000}{0,77 \cdot 110} = 11,8 \text{ А}$$

$$2. \quad M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \frac{n_n}{60}} = \frac{30 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 3000} = 3,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3.  $M = C_m \Phi I_{я}$  для номінального режиму

$$M_n = C_m \Phi I_{ян} \rightarrow C_m \Phi = \frac{M_n}{I_{ян}} = \frac{3,18}{11,3} = 0,28, \text{ де}$$

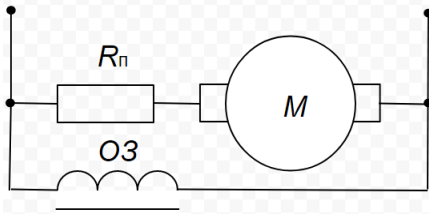
$$I_{ян} = I_n - I_{зб} = I_n - \frac{U_n}{R_B} = 11,8 - \frac{110}{220} = 11,3 \text{ А}$$

4. При  $I_{\Pi} = 2I_n = 2 \cdot 11,8 = 23,6 \text{ А}$

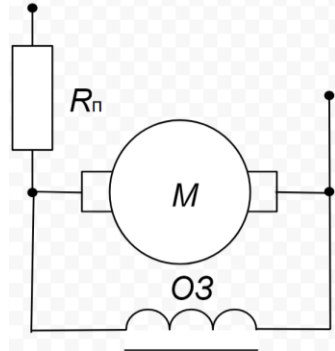
$$I_я = I_{\Pi} - I_B = 23,6 - 0,5 = 23,1 \text{ А}$$

$$M_{\Pi} = C_m \Phi I_я = 0,28 \cdot 23,1 = 6,47 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Схема увімкнення  $R_{\Pi}$ :



а) правильна



б) неправильна

Рис. 3.5 – Схема увімкнення  $R_{II}$

Для схеми а)  $I_{я} = 23,1 \text{ A} \rightarrow R_{II} + R_{я} = \frac{U}{I_{я}} \rightarrow R_{II} + 1,2 = \frac{110}{23,1} \rightarrow R_{II} = 3,56 \text{ Ом}$ .

Для схеми б)  $I_{II} = \frac{U}{R_{II} + \frac{R_{я} \cdot R_{B}}{R_{я} + R_{B}}} \rightarrow 23,6 = \frac{110}{R_{II} + 1,19} \rightarrow R_{II} = 3,47 \text{ Ом}$

Тоді  $U_{я} = 110 - 23,6 \cdot 3,47 = 28,1 \text{ В} \rightarrow I_{я} = \frac{28,1}{1,2} = 23,4 \text{ A}$ .  $I_{B} = \frac{28,1}{220} = 0,12 \text{ A}$ ,

тобто  $I_{B}$  зменшиться у 4 рази. Для  $25\% I_{вн}$  за таблицею  $\Phi \approx 50\% \Phi_{ном}$ . Тоді  $M_{II} = C_{м} \Phi \cdot 0,5 \cdot 23,4 = 0,28 \cdot 0,5 \cdot 23,4 = 3,28 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Тобто зменшилось удвічі.

### 3.3 Питання для самоконтролю

1. Зобразить схематично влаштування машини постійного струму.
2. Поясніть принцип роботи машини постійного струму в якості генератора і двигуна.
3. Поясніть влаштування і призначення колектора.
4. Виведіть формулу для ЕРС, що наводиться у обмотці якоря.
5. Накресліть характеристику холостого ходу. Поясніть, чому при нульовому струмі збудження ЕРС якоря не дорівнює нулю.
6. Зобразить картину магнітного поля в машині постійного струму для трьох випадків: а) при холостому ході (струм в обмотці якоря відсутній); б) при наявності струму лише в обмотці якоря; в) при наявності струму в обох обмотках (збудження і якоря).
7. Поясніть явище реакції якоря. Як вона впливає на роботу машини ?
8. Що називається комутацією в машині постійного струму ? які процеси з нею пов'язані ?

9. Які існують засоби зменшення реакції якоря ? Які існують способи покращення комутації ?

10. У чому полягає самозбудження генератора ? В якому випадку у генераторі з паралельним збудженням самозбудження на настає ?

11. Зобразіть зовнішню і регульовальну характеристику для генераторів з незалежним і паралельним збудженням.

12. Виведіть формулу для електромагнітного обертального моменту двигуна.

13. Напишіть рівняння за другим законом Кірхгофа для кола якоря машини, яка працює у режимі генератора і двигуна.

14. Накресліть електричну схему машини постійного струму з паралельним і послідовним збудженням.

15. Напишіть рівняння за першим законом Кірхгофа для машини з паралельним збудженням, що працює, що працює в режимах генератора і двигуна.

16. Зобразіть графічно залежності  $n(M)$  для машин з паралельним і послідовним збудженням.

17. Які двигуни (з якою системою збудження) застосовуються у верстатах і підйомно-транспортних механізмах ?

18. Напишіть формули механічних характеристик двигунів з паралельним і послідовним збудженням.

19. Наведіть способи регулювання частоти обертання двигуна постійного струму і вкажіть їх переваги і недоліки.

20. Накресліть в загальній системі координатних осей три механічних характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням – природно і дві штучні: а) при увімкненні реостата у коло якоря; б) при увімкненні регульовального реостата у коло обмотки збудження.

21. Зобразіть схему увімкнення двигуна з паралельним збудженням, яка дає змогу реверсу вати двигун.

22. Зобразіть умовно-логічну схему генератора постійного струму незалежного збудження і поясніть по ній принцип його роботи.

23. Зобразіть умовно-логічну схему генератора постійного струму змішаного збудження і поясніть по ній принцип його роботи.

## ТЕМА 4. КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

**Мета** - оволодіння знаннями основних схем керування електроприводами постійного і змінного струму та принципу їх роботи.

**Завдання:** ознайомитись з елементами схем керування електроприводами, проаналізувати переваги і недоліки існуючих схем, навчитись складати схеми керування реверсивними і неревверсивними двигунами

### 4.1 Теоретичні відомості

*Керування електроприводами постійного струму.* Пуск двигунів постійного струму (ДПС) малої потужності (десятки та сотні ват), що мають великі опори обмоток якоря і тому не потребують обмеження пускових струмів, проводиться безпосередньо включенням обмоток якоря та збудження до мережі живлення (рис. 4.1). Для цього використовуються малопотужні контактори КМ або реле К з керуванням від кнопки керування SB1 та SB2 або просто вимикачі Q, які вмикають та вимикаються оператором.

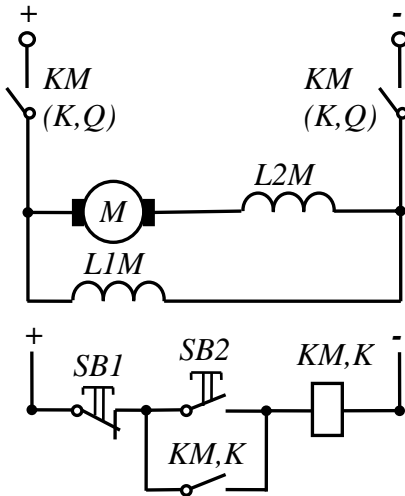


Рис.4.1 – Схема керування двигуном постійного струму малої потужності

Пуск ДПС малої, середньої та великої потужності (одиниці – сотні кіловат) здійснюються з пусковими резисторами, які обмежують пускові струми. Підключення обмотки якоря та обмоток паралельного і послідовного збудження до напруги мережі здійснюється лінійними контакторами КМ1 та КМ2, як показано на рис.

Ці контактори використовуються також для увімкнення до мережі живлення незалежної обмотки збудження, яка частіше підключається при подачі напруги живлення на схему вимикачем Q (рис. 4.2 б). Іноді використовується контактор КМ6 (рис. 4.2 а). Стабілізація динамічного моменту ДПС здійснюється ступеневопо-  
послідовним відключенням ступенів пускового резистора. Число ступенів залежить від моменту статичного опору та необхідного прискорення при пуску двигуна.

Виведення ступенів пускового резистора здійснюється замиканням контактів контакторів прискорення КМ3, КМ4 та КМ5, як показано на рис. при трьох ступенях пускового резистора (R1, R2 та R3). Найбільше поширення отримала схема, наведена на рис. 4.2 а, як найбільш проста та надійна. Схема використовується для ДПС малої та середньої потужності (до 150 кВт при напрузі до 220 В). В схемі використовуються всі контактори однакової величини, оскільки при виведеному пусковому резисторі всі їх контакти



пропускають струм якоря ДПС. Схема ввімкнення контактів контакторів рис. б використовується для ДПС малої та середньої потужності (до 300 кВт, напругою до 220 В), що працюють в тривалому режимі, коли контакти контакторів КМ2, КМ3 та КМ пропускають тільки пускові струми.

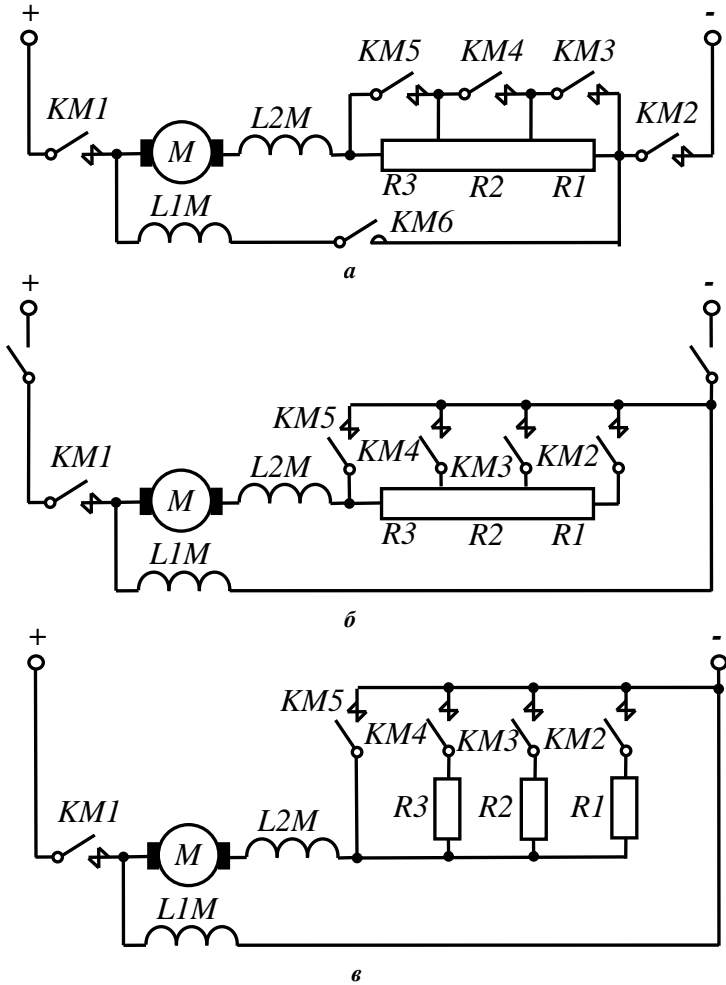
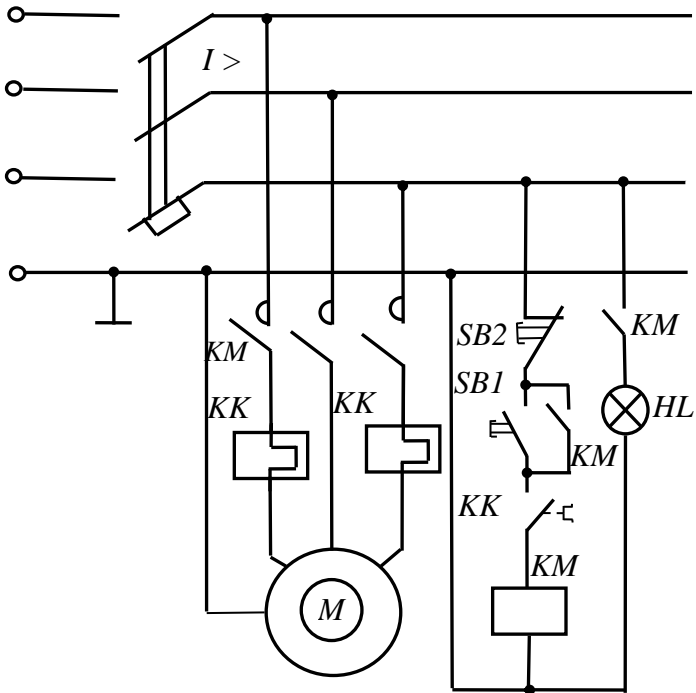


Рис.4.2. Схема керування двигуном постійного струму з пусковими резисторами

Схема, зображена на рис. 4.2 в використовується для ДПС великої потужності. Вона дозволяє застосувати контактори КМ2, КМ3 та КМ4 меншої величини незалежно від режиму роботи ДПС. При тривалому режимі роботи ДПС в схемах рис. 4.2 б, в, щоб уникнути нагрівання обмоток контакторів КМ2, КМ3 та КМ4, їх відмикають після ввімкнення контактора КМ5. Недоліком схем рис. 4.2 б, в є можливість виникнення аварійного режиму при приварюванні

контакту контактора КМ5, для уникнення чого в схемі керування використовується блокування, що забороняє пуск, якщо хоча б один контактор прискорення після відключення залишився закритим.

*Керування електроприводами змінного струму.* Схема нереверсивного керування трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором дає змогу автоматично пускати та зупиняти двигун магнітним пускачем.

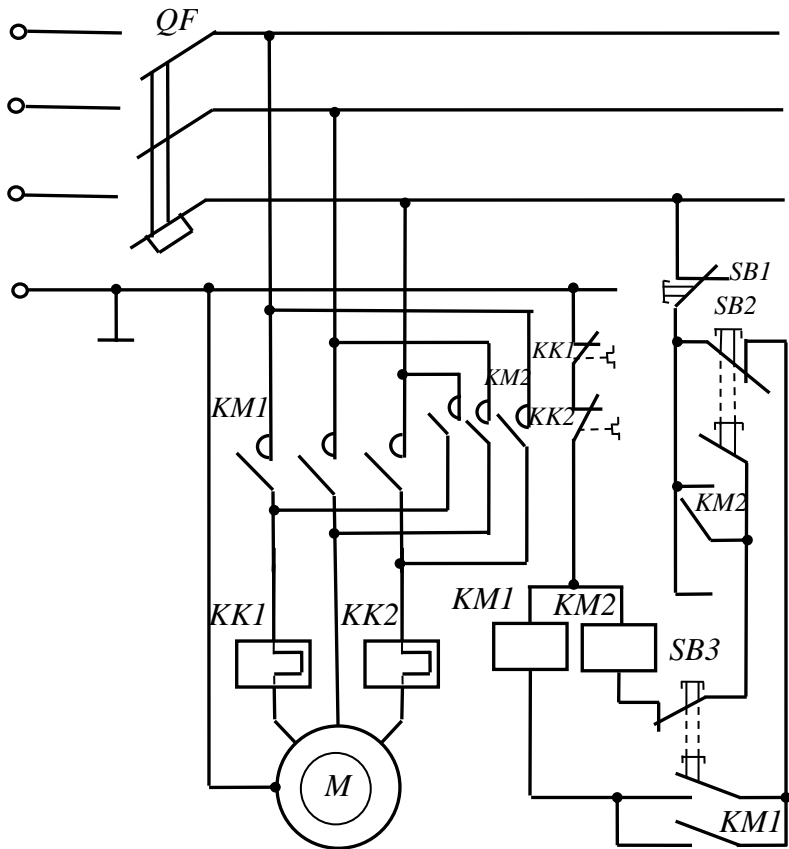


**Рис. 4.3 – Схема нереверсивного керування трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.**

Магнітний пускач – апарат, який складається з контактора змінного струму КМ та двох теплових реле КК, змонтованих в загальному кожусі. Контактор є електромагнітом з рухомих осердям. Котушка контактора КМ вмикається в коло фазної напруги через кнопки SB1 «Пуск» та SB2 «Стоп». При натисканні на пускову кнопку SB1 у котушці з’являється струм, контактор спрацьовує, втягуючи в котушку осердя. Разом з осердям переміщується механічно зв’язана з ним траверса та закріплені на ній контакти, що замикають коло двигуна. Так відбувається пуск двигуна. Для його зупинки достатньо натиснути на кнопку SB2, в результаті чого розмикається коло котушки контактора та під дією пружин осердя та траверса з контактами повертаються у вихідне положення, розімкнувши коло електродвигуна.

Двигун відключається від мережі не тільки кнопкою SB2, але і у випадку спрацьовування хоча б одного з двох теплових реле КК, які призначені для захисту двигуна від перевантажень. Нагрівальні елементи теплових реле знаходяться в силовому колі, і у випадку тривалого навантаження реле спрацьовує та розмикає свій контакт у колі керування, що приводить до автоматичного вимикання двигуна. Для захисту силового кола від струмів коротких замикань в схемі встановлено автоматичний вимикач QF.

У схемі керування реверсивним асинхронним двигуном (рис. 4.4) застосовується реверсивний магнітний пускач, що має два контактори, один з яких вмикає двигун «уперед», інший – «назад». Зміна напрямку обертання (реверсування) двигуна здійснюється за рахунок перемикання фаз А та С на затискачах двигуна за допомогою контакторів КМ1 «Вперед» та КМ2 «Назад». При увімкненні кнопки SB3 колу: фаза С, кнопка SB1, розмикальний контакт кнопки SB2, замикаючий контакт кнопки SB3, котушка КМ2, замкнуті контакти теплових реле КК1 та КК2, нульовий провідник – отримає живлення котушка контактора КМ1, і двигун запуститься «вперед». При натисканні кнопки SB2 отримає живлення котушка контактора КМ2 і двигун запуститься «назад».



**Рис.4.4 – Схема реверсивного керування трифазним асинхронним двигуном**

Пускові кнопки SB2 та SB3, крім замикальних, мають розмикальні контакти, ввімкнені в коло керування так, щоб попередити одночасне ввімкнення контакторів KM1 та KM2, тобто попередити коротке замикання між фазами А та С силового кола.

#### **4.2 Задачі**

*Задача 1.* На рис. 4.5 зображена принципова схема керування пуском електродвигуна постійного струму паралельного збудження в функції часу. Позначення на схемі: Л – котушка намагнічування, головні та блокувальні контакти лінійного контактора; 1КУ, 2КУ, 3КУ – котушки намагнічування, головні та блокувальні контакти контакторів прискорення; 1РВ, 2РВ, 3РВ – котушки намагнічування та замикаючі контакти реле часу. Розглянути процес пуску двигуна та визначити уставки реле часу 1РВ, 2РВ, 3РВ, якщо відомо, що з

моменту натискання кнопки «Пуск» до шунтування контактами ЗКУ опору R3 проходить час  $t_n$ . Власний час ввімкнення контакторів  $t_{вмк}$ .

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до задачі 1

	№ варіанту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_n, c$	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,5	2,2	1,0
$t_{вмк}, c$	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

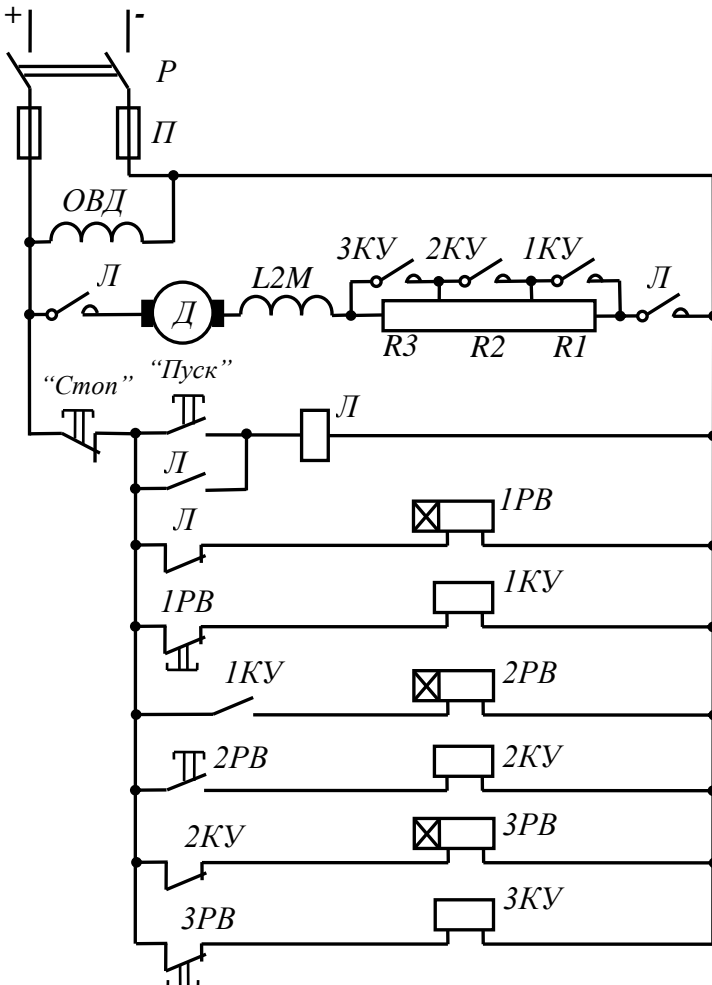


Рис. 4.5 – Схема до задачі 1

*Вказівки до розв'язання.* Орієнтовно можна вважати, що на першому ступені двигун розганяється протягом часу  $t_1=0,5\div 3$  с (нижня межа відповідає двигунам меншої потужності, верхня – двигунам більшої потужності), на другому ступені на його розгін потрібно в два рази менше часу та на третьому ступені – в чотири рази менше. Наприклад,  $t_{ycm1}=0,7$  с;  $t_{ycm2}=0,2$  с,  $t_{ycm3}=0,1$  с.

*Задача 2.* На рис. 4.6 зображена принципова схема керування пуском асинхронного електродвигуна з фазним ротором. Позначення на схемі: Л – котушка намагнічування, головні та блокувальні контакти триполюсного лінійного контактора, за допомогою якого обмотка статора двигуна підключається до мережі; 1РМ, 2РМ – котушки намагнічування (сила намагнічування пропорційна струму статора) та блокувальні контакти, що розмикають коло котушки контактора Л в тому випадку, якщо струм хоча б однієї з фаз обмотки статора перевищить допустиме значення;  $R_1, R_2, R_3$  – ступені пускового реостата; 1РУ, 2РУ, 3РУ – котушки намагнічування та блокувальні контакти реле прискорення; РБ – котушка намагнічування та блокувальний контакт реле блокування, що забезпечує деяку витримку часу для того, щоб струм в колі ротора досягнув значення, при якому реле прискорення 1РУ, 2РУ, 3РУ відкрили б свої контакти розмикавання; 1У, 2У, 3У – котушки намагнічування, головні та блокувальні контакти контактів прискорення, головні контакти яких шунтують ступені пускового реостата. Прослідкувати роботу схеми після натискання кнопки «Пуск». Побудувати сімейство пускових характеристик.

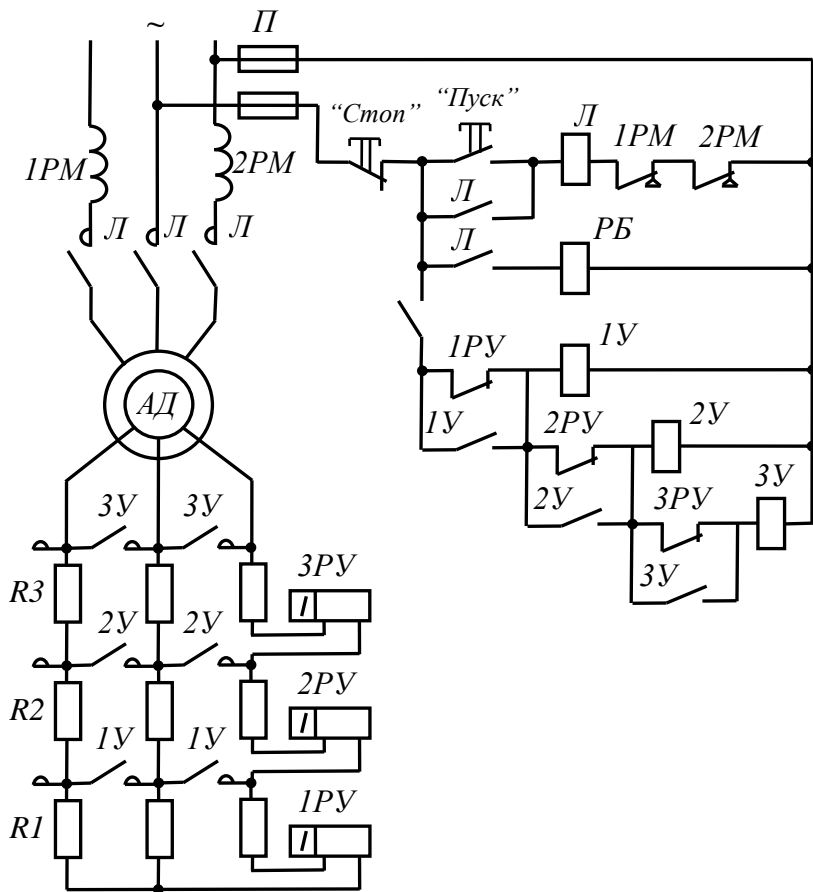


Рис. 4.6 – Схема до задачі 2

*Вказівки до розв'язання.* Послідовність спрацювання (відключення) контактів 1У, 2У, 3У досягається налаштуванням, яке виконується у відповідності з нерівністю  $I_{1У} > I_{2У} > I_{3У}$ .

При значеннях струмів в колі ротора, близьких до струмів уставок реле прискорення, можливі вібрації рухомих частин магнітопроводів, а разом з ними і контактів контакторів 1У, 2У, 3У, що не сприяє нормальному ввімкненню контакторів 1У, 2У, 3У. Щоб уникнути цього блок-контакти контакторів 1У, 2У, 3У шунтують відповідно блок-контактами контакторів 1У, 2У, 3У.

### 4.3 Питання для самоперевірки

1. Чи можлива нормальна робота схеми нереверсивного керування трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором без контактів КМ, ввімкнених на схемі паралельно кнопці SB1?
2. При якому режимі в схемі нереверсивного керування трифазним асинхронним двигуном горить лампа сигналізації HL?
3. Який контактор ввімкнеться в схемі керування реверсивним асинхронним двигуном, якщо натиснути кнопку SB3?
4. Як буде працювати схема керування реверсивним асинхронним двигуном при одночасному натисненні кнопок SB2 та SB3?
5. Які контакти називають замикальними, які – розмикальними ?
6. Що відбудеться в схемі нереверсивного керування асинхронним двигуном при короткому замиканні в колі лампи сигналізації?
7. Яке призначення розмикальних контактів пускових кнопок в схемі реверсивного керування асинхронним двигуном.
8. Навіщо потрібні блок-контакти, які вмикаються паралельно пусковим кнопка?



## ЛІТЕРАТУРА

1. Будішев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник / М.С. Будішев - Львів: Афіша, 2001.
2. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
3. Електротехніка. Практикум з основ електромеханіки та електроприводу : навч. посіб. / А. А. Щерба, В. П. Грудська, Л. Ю. Спінул. - К.: НТУУ “КПІ”, 2014. - 290 с.
4. Теоретичні основи електротехніки: Підручник у 3 т. / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб, І. А. Курило, В. І. Шеховцов, Н. А. Шидловська; за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. - К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. - Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. - 272 с.
5. Загальна електротехніка. Паначевний Б.І., Свєргун Ю.Ф. Підручник. — К.: Каравела, 2018. — 296 с.