

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

Капаціла Ю.Б.

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторної роботи  
«Вивчення будови і зняття характеристик асинхронних двигунів» з  
курсу «Технічні засоби автоматизації» для здобувачів освітнього  
ступеня «бакалавр»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»

Тернопіль  
2020

Методичні вказівки розроблено у відповідності з навчальним планом підготовки здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

**Укладач:** к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.;

**Рецензент:** к.т.н., доцент Хвостівський М.О.

**Відповідальний за випуск:** к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.

Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв (протокол №1 від 2 вересня 2020 року).

Затверджено та рекомендовано до друку науково-методичною комісією факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії ТНТУ (протокол № 3 від 3 листопада 2020 року).

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
1. Будова і принцип дії асинхронного двигуна .....	5
2. Основні характеристики асинхронних двигунів .....	8
3. Робочі характеристики асинхронних двигунів.....	10
4. Опис моделей асинхронних двигунів .....	11
5. Навчальні завдання і методичні вказівки до їх виконання .....	13
ЗМІСТ ЗВІТУ .....	17
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ .....	17
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	18

## ВСТУП

Лабораторні роботи виконуються для закріплення теоретичних знань, отриманих студентами під час лекційних занять та самопідготовки. Метою виконання лабораторних робіт є вироблення у студентів навичок та вмінь самостійної роботи при вивченні фізичних процесів, які проходять в електричних та електронних приладах.

Методичні вказівки забезпечують можливість студентам опрацювати необхідний теоретичний матеріал, самостійно підготуватись до виконання лабораторної роботи, оформити звіт та перевірити свої знання.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» усіх форм навчання.

**Тема.** Вивчення будови і зняття характеристик асинхронних двигунів.

**Мета:** зняти і побудувати робочу і механічну характеристики трифазного асинхронного двигуна (АД). Вивчити моделі АД і дослідити їх роботу в перехідних режимах.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

### 1. Будова і принцип дії асинхронного двигуна

Найбільшого застосування в промисловості набули трифазні асинхронні двигуни (АД) (рис. 1). Це пояснюється тим, що вони прості за конструкцією, дешеві, надійні в роботі, мають високий ККД при номінальному навантаженні, витримують значні перевантаження, не потребують складних пускових пристроїв.

Поряд з перевагами АД мають також ряд недоліків, основними з яких є: низький коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ ) при неповному навантаженні (при холостому ході  $\cos\varphi_0 = 0,2\dots 0,3$ ); низький ККД при малих навантаженнях; незадовільні регульовальні характеристики.

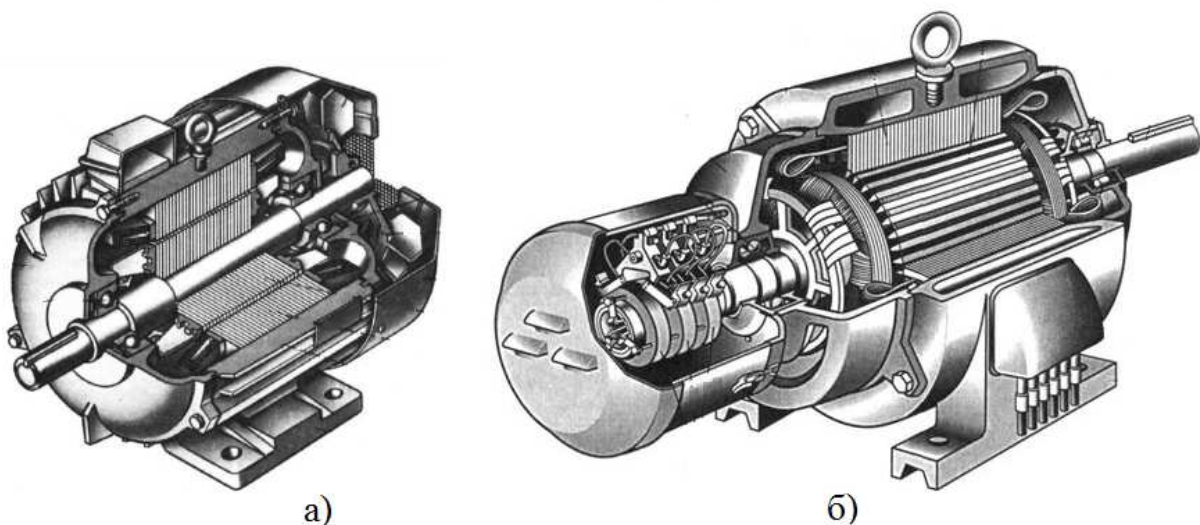


Рисунок 1 – Асинхронний двигун:

а – з короткозамкненим ротором; б – з фазним ротором

Основними частинами АД є статор і ротор, віддалені один від друга повітряним зазором (0,3...0,5 мм). Їх осердя зібрані з аркушів електротехнічної сталі. На внутрішній частині поверхні статора і на зовнішній ротора виштампувані пази, в які вкладені обмотки. Осердя статора поміщено в корпус, на якому закріплені клеми статорної обмотки, яка складається з трьох окремих котушок, зсунутих в просторі на  $120^\circ$  (рис. 2). Осердя ротора закріплене безпосередньо на валу двигуна або на ступиці, яка розміщена на валу.

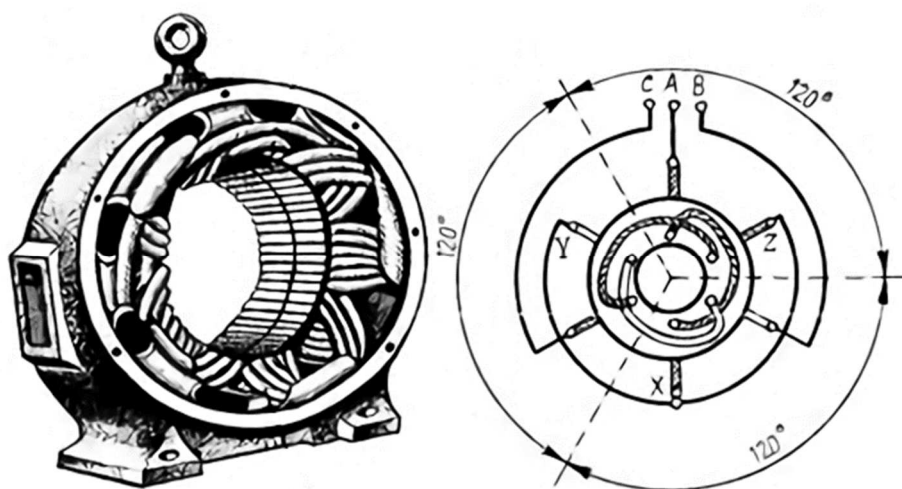


Рисунок 2 – Розташування котушок статора

Обмотка ротора може бути виконана короткозамкненою або трифазною, аналогічно обмотці статора. Короткозамкнена обмотка ротора виконується в вигляді «білячого колеса», що складається з стержнів і замикає їх на торцях кілець (рис. 3, а і б).

В АД з фазним ротором (рис. 1, в) одні кінці обмоток 2 ротора 1 з'єднують з контактними кільцями 3, які розташовані на валу двигуна, а інші – об'єднують в загальну точку (рис. 3, г). Контактні кільця 3 з'єднуються з контактами нерухомої частини машини з допомогою щіток 4 і щіткотримачів. До них підключають пусковий реостат 5.

Принцип дії АД базується на взаємодії обертового магнітного поля статора (нерухома частина машини) з струмами, які індукуються в роторі (її рухома частина).

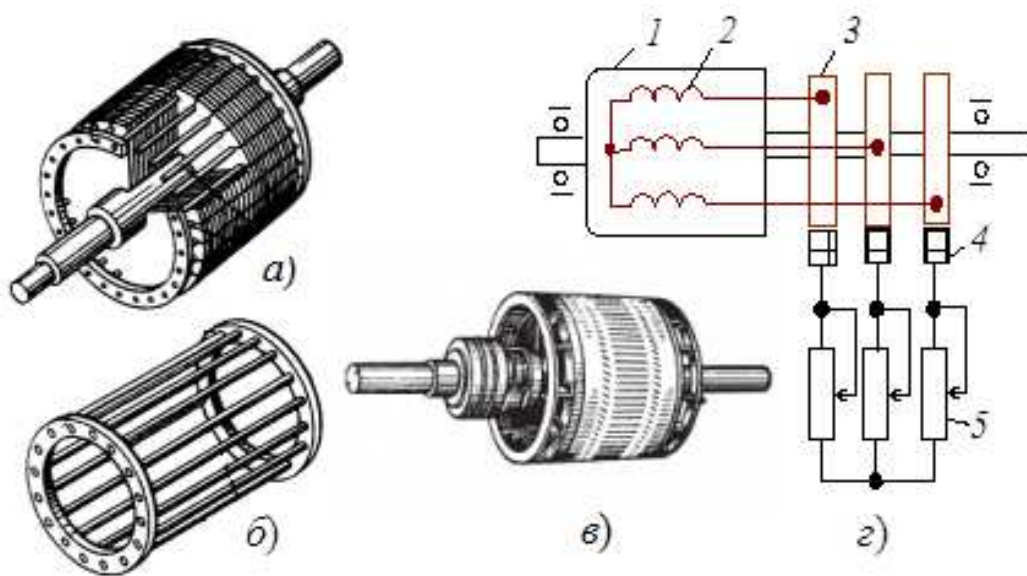


Рисунок 3 – Обмотки ротора

Розглянемо принцип створення магнітного поля машини. Трифазна обмотка статора живиться від трифазного джерела напруги з фазними напругами  $U_{1\phi}$ . Так як три фазні обмотки (зсунуті в просторі одна відносно іншої на  $120^\circ$  (рис. 2) і мають певну кількість витків  $w_1$  з'єднують за схемою зірка або трикутник, то в них протікають струми  $i_1$ , які створюють три магніторушійні сили (МРС)  $F_1 = i_1 w_1$ . Під дією цих трьох МРС утворюється обертове магнітне поле, результуючий вектор магнітного потоку якого  $\Phi_p = 3/2\Phi_m$ , де  $\Phi_m$  – магнітний потік, створений фазною МРС  $F_1$ .

Згідно закону електромагнітної індукції, в обмотках статора і ротора наводяться ЕРС  $e_1$  і  $e_2$ . Ланцюг обмоток ротора завжди замкнутий, тому в фазних обмотках ротора протікають струми  $i_2$ , значення яких залежать від навантаження. Згідно закону Ампера від взаємодії струмів ротора з обертовим магнітним полем статора на валу двигуна виникає крутний момент  $M$ , і, якщо він більше моменту опору  $M_c$  на валу, ротор приходить у обертання. Згідно правилом Льонца струми ротора, як і створюють обертове магнітне поле, впливають на струми статорних обмоток і магнітний потік  $\Phi_m$ , викликаючи зростання струму статора, який компенсує розмагнічувальну дію струмів

роторної обмотки.

Частота обертового магнітного поля статора (в об/хв.) дорівнює  $n_1 = 60f / p$ , де  $f$  – частота напруги мережі;  $p$  – кількість пар полюсів машини (зокрема, три обмотки статора створюють одну пару полюсів, шість обмоток – дві пари і т. д.).

Машина, яка розглядається, називається асинхронною тому, що в ній частота обертання ротора  $n_2$  не дорівнює частоті обертового магнітного поля статора  $n_1$ . Якщо б ці частоти були однакові, то магнітний потік статора був б нерухомий відносно обертового ротора і в обмотках ротора не виникала б ЕРС, не було б в них струмів і не виникав б крутний момент на валу.

Різницю частот обертання поля статора і ротора називають частотою ковзання  $n_s = n_1 - n_2$ , а її відношення до частоти  $n_1$  ковзанням  $S$ , тобто  $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  або виражене в відсотках  $S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100$ . Діапазон зміни ковзання в асинхронному двигуні  $1 \geq S \geq 0$ ; при пуску  $S = 1$ , при холостому ході  $S = 0,001 \dots 0,005$ , при номінальному навантаженні  $S = 0,03 \dots 0,07$ .

## 2. Основні характеристики асинхронних двигунів

Однією з основних характеристик АД є механічна характеристика  $n_2 = f(M)$  – залежність частоти обертання  $n_2$  від моменту  $M$  на валу двигуна (рис. 4). Природна механічна характеристика (рис. 4 і рис. 5) асинхронного двигуна на робочій ділянці до критичного ковзання описується рівнянням При збільшенні навантаження на валу ковзання  $S$  збільшується, а частота обертання ротора знижується на 5...10%, тобто механічна характеристика АД є жорсткою (рис. 4).

Зміна напрямку обертання ротора АД – реверсування – здійснюється перемиканням будь-яких двох проводів трифазної системи, яка живить двигун.



Крутний момент АД пропорційний квадрату фазної напруги  $U_{1\phi}$  мережі і залежить від ковзання  $S$ , тобто

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_{1\phi}^2 R_2' / S}{(R_1 + R_2' / S)^2 + X_k^2},$$

де  $m_1$  – кількість фаз статора;

$X_k = X_1 + X_2'$ ;  $R_1, X_1, R_2, X_2$  – активний, індуктивний опір обмотки статора і приведені опори обмотки ротора.

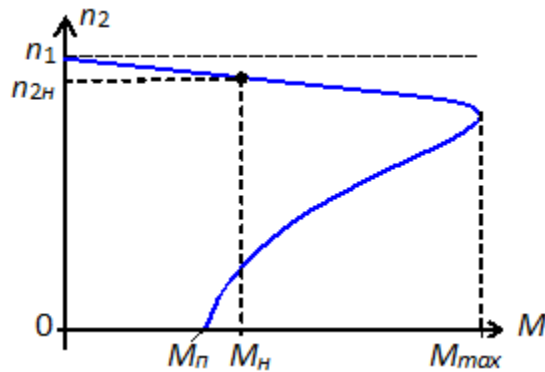


Рисунок 4 – Жорстка механічна характеристика АД

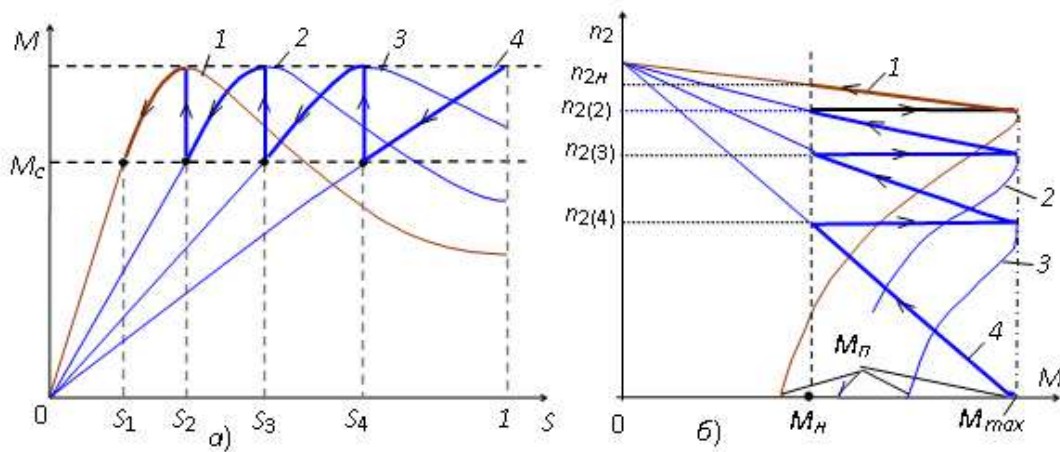


Рисунок 5 – Механічна характеристика АД

При збільшенні моменту опору  $M_c$  на валу збільшується ковзання, що призводить до зростання крутного моменту до  $M_c$ .

Ковзання, при якому момент досягає максимального значення  $M_{max}$ , називається критичним і визначається за виразом  $S_{кр} \approx R_2' / X_k$ .

Критичне ковзання  $S_{кр}$  і пусковий момент  $M_n$  залежать від опору ланцюга ротора (див. криві 2-4 на рис. 5, а), причому пусковий момент  $M_n$  зростає зі збільшенням опору ротора  $R_2$ , досягаючи  $M_{max}$  при  $R_2' + R_n' \approx X_k$ , де  $R_n'$  – приведений опір пускового реостата, який використовується в АД з фазним ротором для зниження пускового струму, збільшення пускового моменту (див. криву 4 на рис. 5, б), забезпечення плавності пуску і регулювання частоти обертання ротора (див. реостатні механічні характеристики 2-4 на рис. 5, б).

### 3. Робочі характеристики асинхронних двигунів

Експлуатаційні властивості асинхронного двигуна можна оцінити за робочими характеристиками, які зображаються кривими, які виражають графічні залежності від корисної потужності  $P_2$  величин: струму  $I_1$  в обмотці статора, ККД  $\eta$ , ковзання  $S$ , коефіцієнта потужності  $\cos\phi$ , корисного моменту  $M$  на валу АД при  $U_1 = \text{const}$  і  $f_1 = \text{const}$  (рис. 6). Їх визначають експериментально або шляхом розрахунку, використовуючи схему заміщення асинхронного двигуна.

При холостому ході потужність  $P_2 = 0$ , при цьому струми котушок статора  $I_0$ , які створюють обертове магнітне поле, досить великі і складають 30...50 % номінальних струмів  $I_{1н}$ .

Частота обертання ротора  $n_{20} = (0,995...0,998)n_1$ .

По мірі зростання навантаження на валу струм статора збільшується, як і активні потужності  $P_2$  і  $P_1$ . В свою чергу, збільшується коефіцієнт потужності  $\cos\phi$ . При цьому ковзання  $S$  збільшується, а частота обертання вала  $n_2$  зменшується, оскільки це єдина причина збільшення струму і крутного електромагнітного моменту.

Залежність  $M = f(P_2)$  визначається формулою  $M = 9550P_2 / n_2$ , з якої випливає, що ця залежність являє дещо викривлену пряму, що проходить через

початок координат, так як зі збільшенням навантаження на валу частота обертання ротора АД дещо зменшується.

Характер залежності коефіцієнта потужності АД від потужності на валу, тобто  $\cos\varphi = f(P_2)$ , визначається виразом  $\cos\varphi = P_1 / \sqrt{3}U_1I_1$  і дорівнює 0,8...0,9 для нормальних АД середньої потужності при номінальному навантаженні.

Зі зменшенням навантаження на валу  $\cos\varphi$  зменшується і доходить до значень 0,1...0,3 при холостому ході. В цьому режимі корисна потужність на валу дорівнює нулю, проте двигун споживає потужність з мережі, тому  $\cos\varphi_0$  тут не дорівнює нулю.

Характеристика коефіцієнта корисної дії  $\eta = f(P_2)$  АД наростає дуже швидко при збільшенні  $P_2$  від нуля (ХХ) до  $(0,3...0,4)P_{2н}$  і досягає значення 0,8...0,92 при  $P_2 = (0,7...0,8)P_{2н}$ , а потім повільно падає внаслідок зростання змінних втрат (рис. 6).

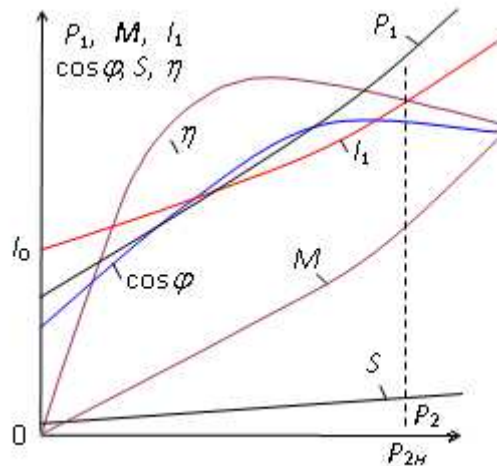


Рисунок 6 – Робоча характеристика асинхронного двигуна

#### 4. Опис моделей асинхронних двигунів

Моделювання АД виконано за каталожними даними  $(P_{2н}, n_{2н}, S_n, U_{1н} = 220 / 380V(D / Y), f_1 = 50 \text{ Гц}, a = I_{1н} / I_{1н}, b = M_n / M_n, l = M_{max} / M_n, \text{ ККД } \eta_n,$

$\cos \varphi_n$ ) для потужностей кВт з використанням Г-подібної схеми заміщення АД для ковзання  $S = 1 \dots S_{кр}$  параметрами:

$$R_2' \approx R_1 = \omega_0 M_n / (3I_{1n}^2); X_k = \sqrt{(U_{1нф} / I_{1н})^2 - (R_1 + R_2')^2};$$

$$I_1 \approx U_{1ф} / \sqrt{(c_1 R_1 + c_2 R_2' / S)^2 + (c X_k)^2};$$

$$M = \frac{3U_{1нф}^2}{\omega_0} \cdot \frac{R_2' / S}{(c_1 R_1 + c_2 R_2' / S)^2 + (c X_k)^2};$$

і Т-подібної схеми заміщення для ковзання  $S = 0 \dots S_{кр}$  параметрами:

$R_2' \approx S_n Z_{1нф}$  або  $R_2' \approx (0,01 \dots 0,08) Z_{1нф}$  (зазвичай  $(0,02 \dots 0,06) Z_{1нф}$ , при цьому менші значення стосуються великих машин, великі – машин малої потужності),

де  $Z_{1нф} = U_{1нф} / I_{1нф}$ ;  $R_1 \approx (1 \dots 1,3) R_2'$ ;

$X_k \approx (0,18 \dots 0,3) Z_{1нф}$ ;  $R_0 \approx (0,1 \dots 0,4) Z_{1нф}$ ;  $X_0 \approx (1,5 \dots 4) Z_{1нф}$ ;

$$M = \frac{2M_{max}}{S_{кр} / S + S / S_{кр}}; S_{кр} \approx S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

де  $S$  – поточне ковзання, обчислене (за допомогою чисельного методу Ейлера) з рівняння динаміки АД:

$$M - M_c = J d\omega / dt, \quad \omega = \omega_0 (1 - S), \quad \omega_0 = 2\pi f_1 / p,$$

де  $M$  – крутний момент АД;

$M_c$  – момент опору на валу АД, прийнятий незалежним від кутової швидкості  $\omega$  і від часу  $t$ ;

$J$  – сумарний момент інерції в  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ , перерахований до валу двигуна;

$c_1, c_2, c$  – коефіцієнти узгодження двох схем заміщення АД.

Приклад моделювання роботи АД з КЗ-ротором типу 4А160S2У3 при зміні моменту опору на валу представлений на рис. 7. Вікна з стрілками, призначені для зміни моменту опору  $M_c$  на валу і опору пускового реостата (для двигунів з фазним ротором). В поля, виділені справа екрану виводяться каталожні параметри двигуна і поточні значення розрахункових величин.

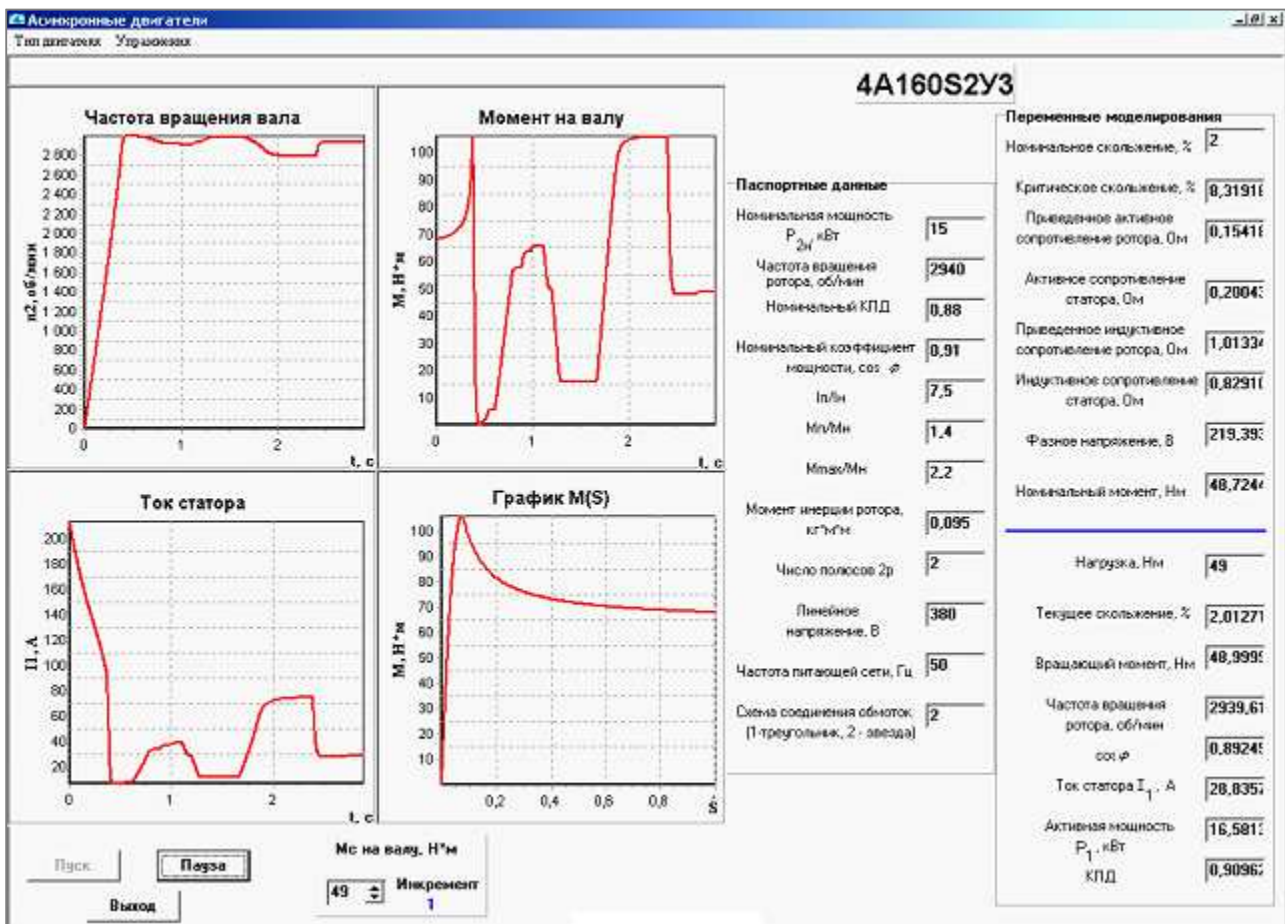


Рисунок 7 – Приклад моделювання роботи АД

Графіки  $n_2(t)$ ,  $M(t)$ ,  $I_1(t)$  і  $M(S)$  можуть бути записані в файл (після натискання правою кнопкою мишки на графіку висвічується закладка «Копіювати в буфер») і роздруковані на принтері.

## 5. Навчальні завдання і методичні вказівки до їх виконання

### Завдання 1

Запустити на виконання програму моделювання роботи АД, а потім на закладці «Тип двигуна» (рис. 7) у вікні, що відкрилося вибрати тип двигуна (для непарних варіантів  $N$  – АД з короткозамкненим ротором; для парних варіантів  $N$  – АД з фазним ротором, де  $N$  – номер запису прізвища студента в навчальному

журналі групи) і внести паспортні дані АД:

**для АД з КЗ ротором в поля табл. 1:**

номінальну механічну потужність  $P_n = P_{2n}$  на валу, номінальну частоту обертання вала  $n_n$ , номінальний ККД  $\eta_n$ , номінальний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_n$ , відношення: пускового струму до номінального  $I_n / I_n$ , пускового моменту до номінального  $M_n / M_n$ , максимального моменту до номінального  $M_{max} / M_n$ , момент інерції приводу  $J$ , приведений до валу АД, лінійну напругу мережі  $U_n$  і частоту  $f_1$ , номінальний струм  $I_n = P_{2n} / \sqrt{3}U_n\eta_n \cos\varphi_n$  ( $P_{2n}$  в Вт), схему з'єднання обмоток статора (зірка Y або трикутник  $\Delta$ );

Таблиця 1 – Тип двигуна і його номінальні дані

$P_{2n}$ , кВт	$n_2$ , об/хв.	$\eta_n$	$\cos\varphi_n$	$I_n/I_n$	$M_n/M_n$	$M_{max}/M_n$	$J$ , кгм <sup>2</sup>	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$f_1$ , Гц	Схема з'єднання обмоток статора (Y або $\Delta$ )

**для АД з фазним ротором в поля табл. 2:**

номінальну механічну потужність  $P_n = P_{2n}$ , на валу, номінальну частоту обертання вала  $n_n$ , номінальний ККД  $\eta_n$ , номінальний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_n$ , номінальне ковзання  $S_n$  (в %), відношення максимального моменту до номінального  $M_{max} / M_n$ , струм ротора  $I_{2n}$  при номінальному ковзанні, напругу між кільцями розімкненої обмотки ротора  $U_{2л}$ , частоту напруги мережі  $f_1$ , лінійну напругу мережі  $U_n$ , момент інерції приводу  $J$ , приведений до валу АД, схему з'єднання обмоток статора і ротора (зірка).

Таблиця 2 – Тип двигуна і його номінальні дані

$P_{2n}$ , кВт	$n_2$ , об/хв.	$\eta_n$	$\cos\varphi_n$	$S_n$ , %	$M_{max}/M_n$	$I_{2n}$ , А	$U_{2л}$ , В	$f_1$ , Гц	$U_n$ , В	$J$ , кгм <sup>2</sup>	Схема з'єднання обмоток статора і ротора
											Зірка

## Завдання 2

Запустити програму моделювання і розрахунку параметрів АД і зняти його механічну і робочі характеристики. Для цього:

- натиснути мишкою на кнопці «Пуск» яка розташована внизу вікна програми моделювання АД (запустити АД), тобто «підключити» обмотки статора АД до трифазної мережі змінного струму і записати в рядок 1 табл. 3 значення лінійної напруги  $U_1$ , лінійного струму  $I_1$ , активної потужності  $P_1$ , яка споживається АД від мережі, частоти обертання ротора  $n_2$  в режимі холостого ходу (корисний момент на валу  $M = 0$ ), які виводяться в відповідних полях на екрані дисплея;

- зняти механічну  $n_2 = f(M)$  і робочі  $I_1 = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ,  $S = f(P_2)$ ,  $P_1 = f(P_2)$ ,  $M = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  характеристики двигуна, виконуючи операції в такій послідовності:

- натиснути мишкою на команді **Мс на валу, Нм**, яка розміщена внизу вікна програми (див. рис. 7), тобто підключити ланцюг обмотки збудження електромагнітного гальма до мережі;

- ступінчасто збільшуючи момент опору (навантаження)  $M_c$  на валу АД (при необхідності, змінюючи крок ступені за допомогою натискання правою кнопкою мишки на закладці «Інкремент» і вибору одного з значень кроку: 1, 2, 3, 4, 5, 10 Нм), записувати в табл. 3 покази вимірювальних приладів при восьми значеннях моменту  $M_c = M$ : від режиму холостого ходу ( $M = 0, P_2 = 0$ ) до значення  $M_c = (1, 2 \dots 1, 5) M_n$  або  $P_2 = (1, 2 \dots 1, 5) P_{2n}$ .

Після встановлення параметрів моделювання натиснути мишкою на кнопці «Пауза», а після занесення параметрів моделювання в звіт і встановлення чергового значення моменту опору  $M_c$  на валу натиснути мишкою на кнопці «Продовжити».

При встановленні моменту опору  $M_c$  на валу більше моменту  $M_{\max}$ , який розвивається двигуном, спрацьовує магнітний пускач: обмотки статора відключаються від мережі.

Таблиця 3 – Результати експерименту

Номер виміру	Результат вимірювань					Результати обчислень			
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , кВт	$n_2$ , об/хв.	$M$ , Нм	$P_2$ , кВт	$S$ –	$\cos\varphi$ –	$\eta$ –
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

### Завдання 3

За даними моделювання роботи АД розрахувати корисну потужність  $P_2$  на валу, ковзання  $S$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  і ККД  $\eta$  двигуна при різних навантаженнях, скориставшись такими розрахунковими формулами:

$$P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9550}; S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \cos\varphi = P_1 / \sqrt{3}U_1I_1,$$

де  $P_2$  – корисна механічна потужність на валу двигуна, кВт;

$M$  – момент обертання асинхронного двигуна, Нм;

$n_2$  – частота обертання ротора АД, об/хв.;

$U_1$  – лінійна напруга мережі, В;

$I_1$  – лінійний струм двигуна, А.

Результати розрахунків занести в табл. 3.

За результатами обчислювального експерименту і розрахунків (табл. 3) побудувати механічну  $n_2 = f(M)$  (рис. 4) і робочу характеристики АД (сумістивши їх в одних координатних осях, викреслюючи для кожної величини свою вісь ординат, див. рис. 6):  $I_1(P_2)$ ,  $\cos\varphi(P_2)$ ,  $S(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $M(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$ .

### Завдання 4

Визначити час розгону АД при холостому під час і при номінальному



навантаженні, скориставшись графіками  $n_2(t)$ , які виводяться на екран дисплея. Скопіювати на сторінку звіту графіки розгону  $n_2(t)$ , АД, на яких відзначити часи розгону  $t_x$  і  $t_n$  (від  $t = 0$  до  $t_n$  при  $n = 0,95n_{2n}$ ).

Примітка. Для парних варіантів (АД з фазним ротором) записати процес розгону при ХХ без пускового реостата, а при номінальному навантаженні з вивідним реостатом зі швидкістю, яка не приводить до «спрацювання» магнітного пускача.

## ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Тема і мета роботи.
2. Електрична схема підключення трифазного асинхронного двигуна до трифазної мережі і пускового реостата (для АД з фазним ротором) до двигуна.
3. Паспортні дані АД і розрахункові формули.
4. Результати вимірювань і розрахунків, зведені в табл. 3.
5. Механічна і робочі характеристики АД.
6. Графіки розгону АД.
7. Висновки.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як змінюється максимальний (критичний) момент трифазного синхронного двигуна зі зміною напруги живлення?
2. Як змінюється частота струму ротора асинхронного двигуна при збільшенні навантаження на валу?
3. З якою метою на щиток двигуна виводяться початки і кінці секцій обмоток статора?
4. При якому режимі роботи АД коефіцієнт потужності буде найнижчим?

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М.: Академия, 2006. 320 с.
2. Марченко А.Л., Освальд С.В. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim. Litres, 2017. 448 с.
3. Проць, Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
4. Савицький В. К., Федоришин Р. М. Технічні засоби автоматизації. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. 292 с.
5. Соснин О. М., Схиртладзе А. Г. Средства автоматизации и управления. Учебник. М.: «Академия», 2014. 240 с.
6. Шандров, Б.В., А. Д. Чудаков. Технические средства автоматизации. М.: «Академия», 2007. 368 с.
7. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. М.: ДМК Пресс. 2015. 360 с.
8. Назарян Г.Н., Федюшко Ю.М., Сотник О.В., Ковальов О.В. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник. Х: ТОВ «Планета-прінт», 2016. 201 с.
9. Яцун М.А. Электричні машини. Львів. Видавництво Львівської політехніки. 2011. 464 с.