

## Лекція №1

### ВСТУП ДО КУРСУ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

#### План лекції:

1. Задачі і зміст курсу.
2. Історична довідка з розвитку електричних машин.
3. Переваги електричних машин в порівнянні із іншими машинами.
4. Класифікація електричних машин.
5. Номінальні дані електричних машин.
6. Взаємне електромеханічне перетворення енергії.

#### 1 Задачі і зміст курсу

**Електричні машини** – комплексна дисципліна про будову і роботу електричних машин, принципи дії і процеси перетворення енергії в електричних машинах.

**Предметом** вивчення навчальної дисципліни є: механічна сила, що виникає в електромагнітному полі; управління режимами роботи та регулювання параметрів зворотного перетворювання електричної енергії в механічну або механічну – в електричну, включно з її генерацією та трансформацією в електричних машинах й апаратах комутації електричних кіл; управління потоками електричної енергії за допомогою комутації електричних кіл низької та високої напруги.

**Міждисциплінарні зв'язки:** Навчальна дисципліна "Електричні машини" базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін "Фізика", "Вища математика", "Теоретичні основи електротехніки". Вона забезпечує використання отриманих знань при вивченні дисциплін: "Споживачі електричної енергії", "Основи релейного захисту та автоматизація в енергосистемах", "Енергетичні системи та комплекси", "Автоматизовані системи контролю та управління енергоресурсами", "Енергозбереження засобами автоматизації", "Енергозбереження засобами промислового електроприводу".

**Метою** викладання дисципліни є ознайомлення студентів з принципом дії та характеристиками електричних машин як основного засобу електромеханічного перетворення енергії у сучасному проми-

словому виробництві та вивчення електричних апаратів як засобів функціонування та захисту електричних машин.

Основними **завданнями** вивчення дисципліни є оволодіння студентами знаннями стосовно конструкції та режимів роботи машин змінного та постійного струму, залежності енергетичних та експлуатаційних показників електричних машин в сталих та перехідних режимах від параметрів електричної енергії, виду та значення механічного навантаження машин.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен

**знати:**

- конструкцію, принцип дії, сучасний стан та напрямки розвитку електричних машин й апаратів низької та високої напруги;
- призначення та доцільність використання електричних машин різних типів й електричних апаратів низької та високої напруги;
- робочі, енергетичні характеристики та техніко-економічні показники електричних машин;
- особливості роботи електричних машин в режимах двигуна та генератора;
- граничні електричні параметри електричних машин з урахуванням вимог до їх захисту;
- основні схеми підключення електричних машин різних типів й електричних апаратів низької та високої напруги і принципи їх функціонування;

**вміти:**

- розраховувати енергетичні показники режимів роботи електричних машин;
- виконувати вибір типу та показників електричних машин в залежності від характеристик механізму та певних умов навантаження;
- виконувати вибір типів та показників електричних апаратів для забезпечення компетентного вибору режимів пуску, гальмування та захисту електричних машин;
- виконувати вибір електричних машин для певних умов роботи з урахуванням питань енергозбереження;
- складати вимоги стосовно компетентного вибору схеми пуску, зупинки, гальмування та захисту електричних машин в певних умовах їх використання;

– проектувати нескладні схеми із використанням електричних машин й апаратів різних типів з урахуванням певних умов їх експлуатації та вимог до надійного захисту під час основних та аварійних режимів.

## **2 Історична довідка з розвитку електричних машин.**

Розвиток вчення про електрику та магнетизм на початку ХІХ і відкриття М. Фарадеєм у 1831 році явища електромагнітної індукції стали поштовхом для створення нового виду машин – електричних машин.

Першими електричними машинами були двигуни постійного струму, що представляли собою фізичні прилади і не мали практичного застосування. Перший двигун з обертовим рухом ротора і магнітним полем, що створюється постійним магнітом, що отримав практичне використання, був збудований російським вченим Б. С. Якобі у 1834 році.

Джерелом живлення двигунів на той час були батареї гальванічних елементів. Розвиток генераторів постійного струму суттєво відставав від розвитку електродвигунів, незважаючи на те, що перша модель генератора італійців братів Піксі була створена у 1832 році. В ній магнітне поле також створювалося постійними магнітами. Вона мала комутаційний пристрій для випрямлення ЕРС та струму. В 1833 році Е. Х. Ленцем був сформульований принцип оборотності електричних машин, згідно з яким будь-яка електрична машина може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Перший промисловий варіант генератора був побудований (1870) німецьким вченим З. Граммом. Цей генератор мав кільцевий якір з тороїдною обмоткою і великою кількістю секцій, сполучених з колектором майже сучасної конструкції. В ньому також вперше було застосовано самозбудження.

Сучасного виду генератор постійного струму набув (1873) у конструкції німецьких електромеханіків Ф. Гефнера-Альтенека та В. Сіменса, що замінили кільцевий якір на барабанний, а з 1878 року барабанний якір вже виконували зубчатим.

До кінця ХІХ століття переважно розвивались тільки машини постійного струму, змінний струм не мав практичного використання. Перша практична установка змінного струму була сконструйована російським винахідником П.Н. Яблочковим (1878) для живлення освітлювальних пристроїв ("свічок Яблочкова"). Ним же був створе-

ний і один із перших генераторів змінного струму, що був прототипом сучасних синхронних машин, а також вперше здійснена трансформація змінного струму за допомогою індукційної котушки з двома обмотками, розміщеними на розімкненому магнітопроводі.

Початок промислового використання трансформаторів для підвищення напруги поклали брати Д. і Е. Гопкінсони, сконструювавши (1884) трансформатор із замкненою магнітною системою.

Значний вклад у розвиток машин змінного струму вніс російський електротехнік, що працював у Німеччині, М.О. Доліво-Добровольський. Використовуючи явище обертового магнітного поля, відкрите (1888) незалежно одним від одного вченими італійцем Г. Феррарісом та хорватом Н. Теслою, він створив у 1889 році трифазний асинхронний двигун. Його конструкція була настільки вдалою, що практично дійшла до наших днів не зазнавши суттєвих змін. До 1891 року М.О. Доліво-Добровольський розробив і впровадив для практичного використання трифазні генератор та трансформатор. З 1900-х років виробництво і використання електричної енергії базується на створенні і розвитку синхронних генераторів, що безпосередньо з'єднувалися із високошвидкісними паротурбінами.

Сучасний розвиток електромашинобудування направлений на підвищення ефективності використання вкладених в одиницю потужності матеріалів, шляхом збільшення одиничної потужності машини (до мільйона кВ·А), використання електротехнічних матеріалів з малими питомими втратами та високими електроізоляційними властивостями тощо. Суттєвий вклад в цю справу внесли українські науковці: Г. І. Денисенко, П. П. Копняєв, А. Д. Нестеренко, І. М. Постников, І. М. Сирота, В. М. Хрущов та інші.

### **3 Переваги електричних машин в порівнянні із іншими машинами**

**Машина** – це сукупність пристроїв (механізмів) з однією чи кількома рухомими частинами, призначена для перетворення одного виду енергії в інший.

**Електричною машиною** слід вважати машину, що здійснює перетворення електричної енергії в механічну (двигун), або, навпаки, механічної в електричну (генератор).

Якщо порівнювати електричну машину з іншими видами машин: паровими, внутрішнього згорання тощо, то вона суттєво переважає їх за рядом показників:

- має високий коефіцієнт корисної дії (ККД) до (70-99) %, для порівняння ККД парової машини не перевищує 7 %;

- екологічно чиста (забруднення навколишнього середовища, пов'язане з виробництвом електричної енергії здійснюється не електричними генераторами, а первинними двигунами);

- може мати будь-які габарити і потужність (від кількох ват (Вт) або навіть кількох часток Вт в пристроях автоматики та побутових приладах до мільйона кВт у генераторів на атомних електростанціях);

- може бути вмонтована в будь-який пристрій (значна кількість виробничих механізмів має дві і більше електричних машин);

- конструктивно проста і тому має вищу надійність в роботі, простота конструкції забезпечує і менші затрати при виготовленні електричної машини та її експлуатації;

- експлуатація електричної машини не завжди вимагає спеціальних знань (наприклад, використання електричних машин у побутових пристроях);

- електричні машини споживають і виробляють енергію, яка легко передається на далекі відстані і підводиться до будь-якого механізму;

- одна і та ж електрична машина може працювати як в якості двигуна, споживаючи енергію від джерела, так і в якості генератора, віддаючи джерелу електричну енергію (наприклад, у електромобілях).

Ці та інші переваги електричних машин дозволяють широко використовувати їх у всіх галузях промислового виробництва, транспорту, військової справи, сільського господарства і в побуті.

#### **4 Класифікація електричних машин**

Електричні машини класифікуються за цілою низкою показників. Найбільш вживаними є класифікація машин: за призначенням, за родом струму, за принципом дії, за потужністю, за частотою обертання тощо.

**Класифікація за призначенням.** За призначенням електричні машини можна класифікувати на електромашинні генератори (генератори), електричні двигуни (електродвигуни), електромашинні пере-

творювачі (перетворювачі), електромашинні компенсатори (компенсатори), електромашинні підсилювачі (підсилювачі) та силові трансформатори (трансформатори), що також вивчаються в курсі "Електричні машини", хоча і не є насправді машинами (не мають рухомих частин, перетворюють електричну енергію в електричну). Віднесення трансформаторів в цей курс пов'язане з тим, що фізичні процеси, які в них відбуваються, повністю співпадають з фізичними процесами, що протікають в електричних машинах, тому положення теорії трансформаторів складає основу теорії електричних машин змінного струму, зокрема асинхронних машин.

**Генератори** перетворюють механічну енергію в електричну. Вони встановлюються на електричних станціях та різних транспортних засобах. На електростанціях їх приводять до обертання парові та гідравлічні турбіни, двигуни внутрішнього згорання, газові турбіни тощо.

**Електродвигуни** перетворюють електричну енергію у механічну, ними приводяться до обертання різноманітні машини, механізми та пристрої, що використовуються у промисловості, сільському господарстві, засобах зв'язку, транспорті, військовій справі та побуті. Вони також використовуються як виконавчі, регулюючі та програмуючі органи.

**Перетворювачі** використовуються для перетворення змінного струму на постійний і навпаки, для зміни величини напруги постійного та змінного струму, частоти струму, числа фаз тощо. На даний час ще досить широко застосовуються в промисловості, у військовій справі та на транспорті.

**Компенсатори** здійснюють генерування реактивної потужності в електричних установках для покращення енергетичних показників джерел та приймачів електричної енергії.

**Підсилювачі** (електромашинні підсилювачі) використовуються для керування об'єктами значної потужності за допомогою електричних сигналів відносно малої потужності, що надходять на їх спеціальні обмотки (обмотки керування). Використання електромашинних підсилювачів, як і перетворювачів, в останній час суттєво знизилось через застосування статичних магнітних та напівпровідникових підсилювачів.

**Електромеханічні перетворювачі сигналів** необхідні для генерування, перетворення та підсилення різноманітних електричних сигналів. Вони звичайно виконуються як електричні машини незначної потужності і використовуються в системах автоматичного регулювання, вимірю-

вальних та обчислювальних пристроях в якості датчиків, диференціюючих та інтегруючих елементів, порівняльних і регулювальних органів тощо.

**Трансформатори** призначені для перетворення напруги змінного струму: в системах передачі та розподілу електричної енергії, у випрямляючих пристроях, пристроях зв'язку, автоматики та обчислювальної техніки, а також для електричних вимірювань.

**Класифікація за конструкцією, родом струму і принципом дії.**

**Конструктивно** електричні машини поділяються на колекторні (в конструкції є пристрій, що називається колектор) та безколекторні машини.

**За родом струму** – на машини постійного струму, машини змінного струму та універсальні, що можуть працювати і на постійному, і на змінному струмі.

Машини змінного струму в залежності від **принципу дії** і особливості конструкції електромагнітної системи підрозділяються на асинхронні, синхронні та колекторні.

**Асинхронні машини** використовуються найчастіше як двигуни трифазного струму. Простота конструкції і висока надійність дозволяють широко використовувати їх у різних сферах виробництва для приводу верстатів, вантажопідіймальних та землерийних машин, компресорів, вентиляторів тощо. В системах автоматичного регулювання застосовуються однофазні та двофазні керовані асинхронні двигуни, асинхронні тахогенератори і сельсини.

**Синхронні машини** найбільш поширені у якості генераторів змінного струму промислової частоти на електричних станціях та генераторів підвищеної частоти в автономних джерелах живлення. В електроприводах великої потужності також використовуються синхронні двигуни, що за певних умов можуть бути і джерелами реактивної енергії, тобто виконувати роль компенсаторів, про застосування яких йшла мова вище. В пристроях автоматики знайшли широке впровадження різноманітні синхронні машини незначної потужності (реактивні, гістерезисні, крокові, індукторні та інші).

**Колекторні машини** змінного струму, маючи складнішу конструкцію і необхідність більш дбайливого догляду, використовуються дуже рідко, головним чином як двигуни. У пристроях незначної потужності, в електропобутових приладах використовуються універсальні колекторні двигуни.

**Машини постійного струму (МПС)** використовуються як генератори та як електродвигуни в електроприводах, що потребують регулювання частоти обертання в широких межах: залізничний та морський транспорт, електротранспорт, прокатні стани, електротрансмісії великовантажних автомобілів, а також коли джерелом живлення є акумуляторні батареї (стартові двигуни, двигуни підводних човнів тощо). Генератори постійного струму на сьогодні, з розвитком напівпровідникової техніки, використовуються не так широко.

**Класифікація за потужністю.** За потужністю електричні машини умовно поділяються на мікромашини, машини малої, середньої та великої потужності.

**Мікромашини** мають потужність від часток вата до 500 Вт, вони можуть бути постійного струму, змінного струму промислової (50 Гц) або підвищеної [(400-2000) Гц] частоти і універсальні.

**Машини малої потужності** – від 0,5 до 10 кВт, працюють на постійному і змінному струмі промислової або підвищеної частоти.

**Машини середньої потужності** – від 10 кВт до 200 кВт (для трансформаторів до 1000 кВ·А).

**Машини великої потужності** – від 200 кВт до мільйона кВ·А. Машини великої та середньої потужності працюють на постійному і змінному струмі промислової частоти.

**Класифікація за частотою обертання.** Електричні машини за частотою обертання умовно поділяються на тихохідні – з частотою обертання до 300 об/хв.; машини середньої швидкохідності – (300 – 1500) об/хв.; швидкохідні – (1500 – 6000) об/хв.; надшвидкохідні – більше 6000 об/хв.

## **5 Номінальні дані електричних машин**

Кожна електрична машина має паспортну табличку, вибиту на металевій пластині (шильдик), що прикріплена до корпусу. На цій табличці вказується тип машини і її номінальні дані, що характеризують основні енергетичні показники і умови роботи, на які машина розрахована.

До номінальних даних електричної машини відносяться: потужність, напруга, струм, частота обертання, частота змінного струму, число фаз, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності і



режим роботи (тривалий, короткочасний тощо). Крім того в паспортній таблиці приводяться такі дані: завод, де виготовлена машина, рік випуску, клас ізоляції, а також додаткові дані, необхідні для монтажу і експлуатації машини (маса, схема ввімкнення обмоток та інші).

Термін "номінальний" можна застосувати і до величин, що не задаються на шильдику, але відносяться до номінального режиму машини, наприклад, номінальний обертовий момент, номінальне ковзання тощо.

**Номінальною потужністю** електричної машини називається потужність, на яку розрахована дана машина за умовами нагрівання і безаварійної роботи на потязі устанавленого терміну служби. Для електродвигунів номінальною потужністю є корисна механічна потужність на валу, виражена у ватах чи кіловатах; для генераторів постійного струму – корисна електрична потужність на затискачах (у ватах або кіловатах); для генераторів змінного струму та трансформаторів – повна електрична потужність на вихідних затискачах (у вольт-амперах чи кіловольт-амперах). Номінальні потужності всіх електричних машин і трансформаторів стандартизовані, так само стандартизовані і частоти обертання електричних машин.

Електричні машини випускаються на стандартні напруги, погоджені зі стандартними напругами електричних мереж, яким рівні стандартні напруги, що підводяться до двигунів. Стандартні напруги на затискачах генераторів на (5–10) % вищі, ніж напруги двигунів; наприклад, якщо стандартна наруга двигуна складає 220 В, то стандартна наруга генератора – 230 В і т. д. В трансформаторах стандартні напруги первинних обмоток рівні "двигунним", а вторинних – "генераторним". Машини змінного струму призначені, як правило, для роботи на симетричній по фазах синусоїдній напрузі, відхилення від цих умов регламентуються стандартами та технічними умовами.

Електричні машини можуть працювати і при неномінальних умовах (зменшене або збільшене навантаження, наруга чи частота, що відрізняються від номінальних). За таких умов енергетичні показники роботи машини, як правило, гірші. При збільшенні навантаження вище номінального, виникає небезпека перегрівання машини і, як наслідок, різке зниження строку служби ізоляційних матеріалів, а отже і всієї машини.

## 6 Взаємне електромеханічне перетворення енергії

Вивчення курсу "Електричні машини" базується на знаннях фізики, математики і, найперше, теоретичних основ електротехніки.

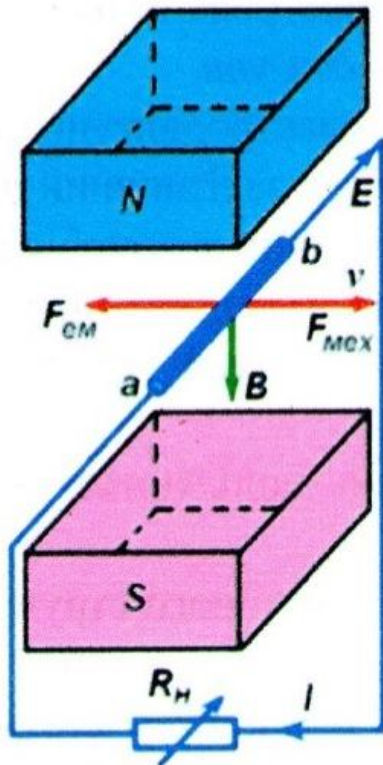


Рисунок 1.1 - Елементарний генератор

Саме на законах електротехніки ґрунтується робота будь-якої електричної машини. Щоб згадати деякі з цих законів і правил, розглянемо на макеті, складеному з двох полюсів магніту  $N$  та  $S$  і провідника  $ab$  (рисунок 1.1), процес взаємного перетворення механічної і електричної енергій.

Якщо до провідника  $ab$  з довжиною  $l$  прикласти механічну силу  $F_{мех}$ , то він буде переміщуватися з лінійною швидкістю  $v$  у напрямку дії цієї сили, перетинаючи силові лінії поля під прямим кутом. Згідно із законом електромагнітної індукції в ньому буде виникати електрорушійна сила (ЕРС)  $E$ :

$$E = B \cdot l \cdot v, \quad (1.1)$$

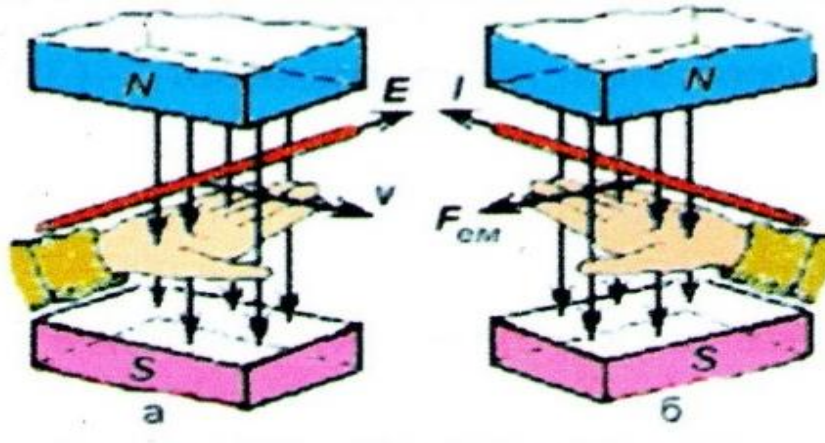
де  $B$  – магнітна індукція, Тл.

Слід пам'ятати, що напрям ЕРС в провіднику визначається **правилом правої руки** (рисунок 1.2, а). Долоня правої руки розташовується в магнітному полі так, щоб лінії індукції входили в неї, відігнутий на  $90^\circ$  великий палець показував напрям руху провідника відносно поля, тоді чотири пальці покажуть напрям ЕРС (на рисунку 1.1 від  $a$  до  $b$ ).

Якщо замкнути провідник на навантаження  $R_n$  то в колі, під дією ЕРС, у напрямі, що співпадає із її напрямом, виникне струм  $I$ . Таким чином, провідник, що рухається в магнітному полі, можна розглядати як елементарний генератор.

В свою чергу, на провідник зі струмом в магнітному полі діє електромагнітна сила (сила Ампера)  $F_{ем}$ :

$$F_{ем} = B \cdot l \cdot I. \quad (1.2)$$



а – правої; б – лівої

Рисунок 1.2 – Правила правої та лівої руки

Напрямок цієї сили визначається **правилом лівої руки** (рисунок 1.2, б). Долоня лівої руки розміщується назустріч лініям магнітного поля, чотири витягнутих пальці – за напрямом струму, тоді великий палець, відігнутий на  $90^\circ$ , покаже напрям сили  $F_{em}$ . На (рисунок 1.1) вона направлена справа наліво, тобто, назустріч руху провідника, отже є гальмівною.

Якщо уявити, що рух провідника рівномірний ( $v = const$ ), то механічна і електромагнітна сили урівноважують одна одну  $F_{mex} = F_{em}$ .

Так як  $v \neq 0$ , то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість  $v$ , отримаємо:

$$F_{mex} \cdot v = F_{em} \cdot v. \quad (1.3)$$

Скориставшись (1.2), підставимо в праву частину (1.3) значення  $F_{em}$ :

$$F_{mex} \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I. \quad (1.4)$$

В лівій частині цього рівняння маємо значення підведеної до провідника механічної потужності, а в правій – значення електричної потужності, що розвивається в замкненому колі струмом  $I$  під дією ЕРС  $E$ . Отже, можна стверджувати, що даний макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється в електричну.

Якщо в цьому ж макеті замість опору навантаження увімкнути джерело живлення з напругою  $U$  (рисунок 1.3), то в провіднику  $ab$ , під дією останньої, виникне електричний струм  $I$  від плюса джерела до мінуса.

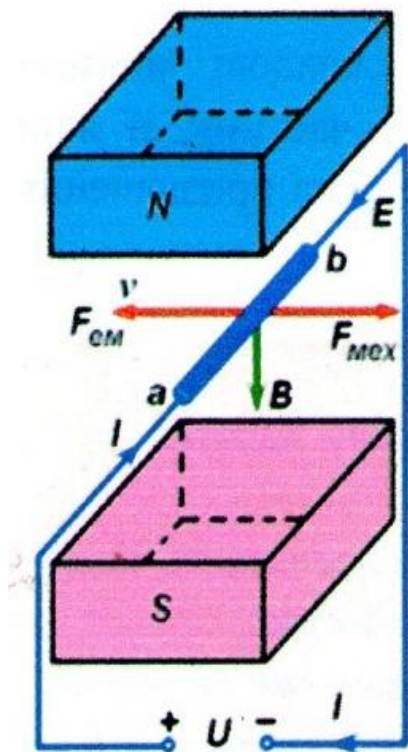


Рисунок 1.3 – Елементарний двигун

Помноживши обидві частини рівняння на струм  $I$  (який, звичайно ж, не дорівнює нулю), отримаємо:

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R. \quad (1.6)$$

Якщо в цьому рівнянні ЕРС  $E$  замінити згідно з (1.1), то будемо мати:

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot R, \quad (1.7)$$

або з урахуванням (1.2):

$$U \cdot I = F_{ем} \cdot v + I^2 \cdot R. \quad (1.8)$$

В лівій частині отриманого рівняння – значення електричної потужності  $U \cdot I = P_1$ , що надходить у провідник від джерела живлення, а в правій те, у що вона перетворюється. Частково це, згідно з (1.3), механічна потужність ( $F_{ем} \cdot v$ ), а частково – електричні втрати ( $I^2 \cdot R$ ), що виникають в провіднику при протіканні струму і перетворюються в так зване Ленц-Джоулівське тепло. Отже, можна вважати, що в цьому випадку макет демонструє роботу елементарного електродвигуна.

Аналізуючи роботу макета в обох випадках, можна зробити такі висновки:

– щоб отримати електричну машину, необхідно мати лише три складові: магнітне поле, електропровідне середовище (провідник) та можливість їх взаємного переміщення;

– при роботі електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна в її провідниках, що перетинають магнітне поле, створюється ЕРС, а також виникають електромагнітні сили, що діють на провідники зі струмом в магнітному полі;

– взаємне перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається в електричній машині в будь-якому напрямі, тобто одна і та ж машина може працювати і як двигун, і як генератор; ця властивість називається **оборотністю** електричної машини.

Так само оборотним є трансформатор та інші електромашинні пристрої: напрям перетворення електричної енергії у них може бути змінений на зворотній. Незважаючи на оборотність, всі машини, що випускаються електромашинобудівними заводами, призначаються для роботи в якому-небудь одному режимі. Це дозволяє краще пристосувати машину до вимог та умов експлуатації, не виконуючи її надмірно важкою і дорогою.

Розглянуті "елементарні" генератор та двигун відображують лише принцип використання в них основних законів та явищ електричного струму. Що стосується конструктивного виконання, то більшість електричних машин побудовані на обертовому русі однієї із двох складових частин, яка називається ротором. Нерухома ж частина називається статором.

## Контрольні запитання

1. Що таке електрична машина?
2. В чому переваги електричних машин перед іншими видами машин?
3. Як класифікуються електричні машини за призначенням?
4. Як класифікуються електричні машини за принципом дії та конструкцією?
5. Як класифікуються електричні машини за потужністю?
6. Як класифікуються електричні машини за частотою обертання?
7. Які величини вказуються на паспортній табличці машини?
8. Яка потужність вважається номінальною потужністю двигуна, а яка генератора?
9. Чи однокові стандартні номінальні напруги електричних двигунів і генераторів?
10. Які закони лежать в основі роботи електричної машини?
11. В чому суть правила правої руки ?
12. В чому суть правила лівої руки ?
13. Напрямок якої величини і як визначається правилом лівої руки?
14. Напишіть формулу ЕРС  $E$  і поясніть величини, які в неї входять, як визначити напрям ЕРС?
15. Напишіть формулу електромагнітної сили  $F_{em}$ , поясніть величини що в неї входять, як визначити напрям електромагнітної сили?
16. Які три складові необхідно мати для створення елементарної електричної машини?
17. В чому полягає оборотність електричної машини?
18. З яких частин складається будь-яка електрична машина?
19. Чому трансформатори вивчаються в курсі "Електричні машини"?