

## ЛЕКЦІЯ №1.

### ВСТУП. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ КУРСУ. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ТА ЙОГО СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ

#### 1.1 Вступ. Основні поняття. Мета та задачі курсу

Теорію електричних явищ поділяють на теорію кіл і теорію електромагнітного поля. Цей поділ викликаний тим, що прикладне використання електромагнітних явищ призвело до застосування пристроїв і систем, в основу яких покладено використання явищ електричних, магнітних, електростатичних й електромагнітних кіл або явищ електромагнітного поля.

**Метою вивчення навчальної дисципліни** є формування у здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти знань, умінь та навичок, необхідних для розуміння основних понять про електричне коло та його складові частини, засоби та методи електротехнічних вимірювань, будову і принцип дії електричних машин постійного та змінного струмів, засвоєння правил електробезпеки.

**Основними завданнями вивчення навчальної дисципліни** є становлення і вдосконалення знань майбутніх фахівців.

#### 1.2 Електричне коло та його складові частини

З'єднання електротехнічних пристроїв, таких як генератори електричної енергії, перетворювачі її параметрів, лінії передачі та приймачі, утворюють електричне коло. Електричними колами називають також з'єднання електротехнічних пристроїв з метою генерування, перетворення, пересилання, розподілу та приймання інформації у вигляді електричних імпульсів – сигналів. Параметри електричних і магнітних кіл (резистанси, індуктивності, ємності,

магнітні опори) визначаються геометричними формами та фізичними властивостями матеріалів відповідних елементів.

Якщо струм у всіх точках будь-яких нерозгалужених ділянок (віток) електричного кола можна з достатньою точністю вважати в заданий момент однаковим за значенням, то таке коло називають колом зі зосередженими параметрами. Однак, це припущення мусить бути обґрунтованим. Так, у реостаті, крім перетворення електромагнітної енергії на теплову, що характеризується його резистансом, існує електричне поле, яке залежить від міжвиткових ємностей реостата, а також магнітне поле, що залежить від індуктивності реостата. Але ці поля при невисоких частотах практично не впливають на електромагнітний процес у реостаті й ними можна знехтувати. В індуктивних котушках за подібних умов електричне поле (через наявність міжвиткових ємностей) у порівнянні з магнітним полем незначно впливає на електромагнітний процес. Перетворення електромагнітної енергії на теплову в індуктивній котушці інколи не беруть до уваги чи, якщо ним не можна знехтувати, враховують виділенням резистансу котушки у вигляді резистора, сполученого послідовно з її індуктивністю.

Прикладом електричного кола з розподіленими параметрами є лінія електропередачі чи лінія передачі інформації – струми у будь-яких їх точках залежать не тільки від часу, але й від простору – відстані цих точок від початку (кінця) лінії. Зазвичай такі кола характеризують питомими параметрами на одиницю довжини лінії.

**ЛЕКЦІЯ №2.**  
**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО**  
**ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ.**  
**ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ**

**2.1 Електричний заряд. Основні поняття про електромагнітне поле**

Основою всіх електромагнітних явищ є електричний заряд та електромагнітне поле.

**Електричний заряд**  $q$  – джерело електромагнітного поля, яке пов'язане з матеріальним носієм; елементарний електричний заряд – це внутрішній параметр елементарної частинки, що визначає її електромагнітну сутність, здатність до взаємодій. Розрізняють два види електричних зарядів, які умовно називають додатними («+») та від'ємними («-»). Останні називають електронами – елементарні від'ємно заряджені частинки; заряд електрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Електромагнітне поле** – особливий вид матерії, який у всіх точках простору поєднує дві його складові, що називаються, відповідно, електричне та магнітне поля.

**Електричне поле** – одна з складових електромагнітного поля, яка проявляється у дії на електрично заряджену частинку із силою  $\vec{F}_E$ , пропорційною зарядові частинки  $q$  і незалежною від швидкості її руху. Це поле характеризується векторною величиною – напруженістю електричного поля  $\vec{E}$ , яка чисельно дорівнює відношенню сили, що діє на заряджену частинку, до її заряду і має напрямок сили, що діє на частинку з додатним зарядом, тобто

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_E}{q}.$$

**Магнітне поле** – друга складова електромагнітного поля, яка проявляється у дії на рухому електрично заряджену частинку із силою  $\vec{F}_M$ , пропорційною

заряду частинки  $q$  і швидкості її руху  $V$ . Це поле характеризується векторними величинами: напруженістю магнітного поля  $\vec{H}$  і пов'язаною з нею магнітною індукцією  $\vec{B}$ .

Чисельно магнітна індукція дорівнює відношенню сили  $F_M$  до добутку заряду  $q$  і швидкості  $V$  частинки, тобто  $B = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F_{M \max}}{q \times V}$ , якщо напрямок швидкості такий, що ця сила максимальна. Вектор магнітної індукції перпендикулярний до векторів сили  $\vec{F}_M$  і швидкості  $\vec{V}$ , а його напрямок при цьому збігається з поступальним переміщенням правоходового гвинта при його обертанні від напрямку сили до напрямку швидкості частинки з додатним зарядом. У підсумку перелічені величини поєднує формула  $\vec{F}_M = q[\vec{V} \times \vec{B}]$ .

У природному стані різні матеріальні тіла є електрично нейтральними, тобто елементарні додатні та від'ємні заряди рівномірно розподілені в їхньому об'ємі і врівноважують один одного. Щоб вивільнити заряди різних знаків і примусити їх рухатись в заданому напрямку, треба затратити енергію. Сили, які розділяють заряди різних знаків, долаючи електростатичні сили між ними, називаються сторонніми.

## 2.2 Основні фізичні величини

Для опису електромагнітних полів і процесів застосовують ряд наступних електричних величин.

**Електричний струм** – це впорядкований рух електрично заряджених частинок. За напрямок струму приймають напрямок руху додатно заряджених частинок. Якщо струм створюється від'ємно зарядженими частинками, то напрямок струму вважають протилежним напрямку їхнього руху. Кількісно електричний струм характеризується скалярною величиною – **силою струму**  $I$  і векторною величиною – **густиною електричного струму**  $\vec{J}$ . Сила струму дорівнює відношенню абсолютного значення електричного заряду  $dq$ , який

проходить за малий проміжок часу  $dt$  крізь визначену поверхню (наприклад, крізь поперечний переріз провідника), до значення  $dt$ , тобто  $I = dq/dt$ .

Для опису потенціальної енергетичної здатності електричного поля існує скалярна величина – **електричний потенціал**  $\varphi$ . Потенціал даної точки поля – це відношення роботи  $A$ , яку може виконати поле, переміщуючи заряд  $q$  із заданої точки в нескінченно віддалену точку, до самого заряду, тобто  $\varphi = A/q$ . Нескінченно віддалену точку беруть там, де електричне поле відсутнє тобто потенціал дорівнює нулю.

**Електрична напруга** – це скалярна величина, яка є похідною до потенціалу і яка введена для енергетичної характеристики електричного поля або електричного кола. Вона характеризує здатність поля виконувати роботу при переміщенні заряджених частинок між точками простору. Електрична напруга між двома точками електричного кола або електричного поля чисельно дорівнює роботі електричного поля, затраченій на переміщення одиничного додатного заряду із точки  $a$  в точку  $b$ . У загальному випадку напруга дорівнює відношенню роботи  $A$ , яку виконує поле переміщуючи заряд  $q$  із даної точки в іншу точку, до величини заряду, тобто  $U_{ab} = A/q$ . У потенціальному електричному полі ця робота не залежить від шляху переміщення заряду. В такому разі електрична напруга між двома точками дорівнює різниці потенціалів між ними, тобто  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ .

**Електрорушійна сила (ЕРС)** – це скалярна величина, яка характеризує дію сторонніх сил у джерелах постійного або змінного струму. Сторонні сили призводять до руху електричні заряди всередині генераторів. ЕРС  $E$  чисельно дорівнює роботі, яка виконується силами стороннього електричного поля при перенесенні вздовж замкненого контуру електричного кола одиничного додатного електричного заряду. В загальному випадку ЕРС дорівнює відношенню роботи  $A$ , яку виконують сторонні сили, переміщуючи заряд  $q$  вздовж замкненого провідникового контуру, до величини заряду, тобто  $E = A/q$ . З іншого боку, ЕРС джерела напруги дорівнює різниці потенціалів або напрузі

на його електродах (полюсах) при розімкненому зовнішньому колі, тобто при відсутності електричного струму в джерелі.

Взаємодія та взаємовідношення величин, що описують електромагнітні процеси в електротехнічних пристроях, регулюються законами електромагнетизму.

**ЛЕКЦІЯ №3.**  
**ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ**

**3.1 Закон Ома**

**Закон Ома має наступні варіанти:**

а) сила струму  $I$  прямо пропорційна напрузі  $U$  і обернено пропорційна електричному опору  $R$  ділянки кола (рис. 1.1,а):

$$I = \frac{U}{R} ; \quad (1.1)$$

б) сила струму в електричному колі прямо пропорційна ЕРС джерела електроенергії й обернено пропорційна повному опору кола (рис. 1.1,б):

$$I = \frac{E}{R + R_0} ; \quad (1.2)$$

в) узагальнений закон Ома (рис.1.1,в) для ділянки кола (знак « $\leftarrow$ » у разі зміни напрямку напруги):

$$I = \frac{E \pm U}{R} . \quad (1.3)$$

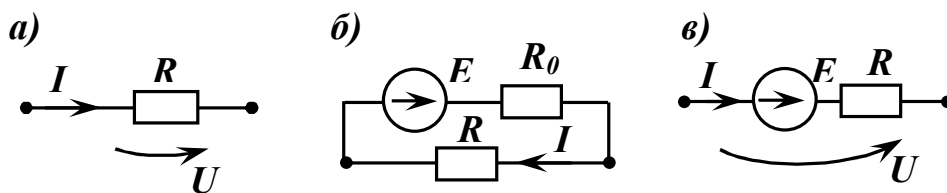


Рис. 1.1

### 3.2 Закони Кірхгофа

**1-ий закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів віток у вузлі електричного кола, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0, \quad (1.4)$$

де  $m$  – кількість віток у даному вузлі.

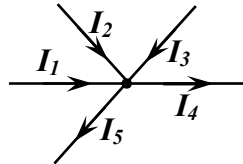


Рис. 1.2

Або, наприклад, обираючи напрямок до вузла додатним, маємо для випадку на рис. 1.2:

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

Або:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5,$$

тобто сума струмів, які підтікають до вузла, рівна сумі струмів, які з нього витікають.

**2-ий закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума спадів напруг на елементах замкненого контуру електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що знаходяться в цьому контурі.



Тобто:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^q E_k, \quad (1.5)$$

де  $n, q$  – кількості пасивних елементів і джерел ЕРС у даному контурі. Або, для прикладу, вибравши вказаний на рис. 1.3 напрямок обходу контуру можна записати:

$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 - R_3 I_3 = E_1 - E_2.$$

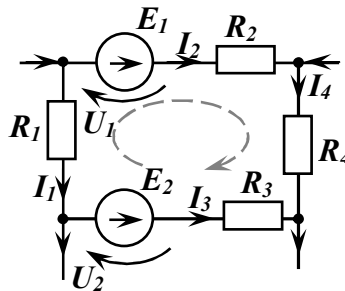


Рис. 1.3

### 3.3 Закон Джоуля-Ленца

Теплова енергія, що виділяється в провіднику (наприклад, у резисторі) дорівнює добутку квадрата сили струму  $I$ , опору провідника  $R$  і часу  $t$ , а саме:

$$W_T = I^2 R t. \quad (1.6)$$

### 3.4 Закон Біо-Савара-Лапласа

Індукція  $d\vec{B}$  магнітного поля, що створюється елементом струму  $I\vec{dl}$  на відстані  $r$  від нього в однорідному середовищі з відносною магнітною проникністю  $\mu_r$  (рис. 1.4), обернено пропорційна квадрату відстані і прямо пропорційна елементу струму і синусу кута  $\beta$  поміж векторами  $\vec{dl}$  і  $\vec{r}$ , тобто у векторній, а потім і в скалярній формах:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu_r}{4\pi r^3} [I \cdot \vec{dl} \times \vec{r}]; \quad dB = \frac{\mu_0\mu_r Idl}{4\pi r^2} \sin \beta, \quad (1.7)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала.

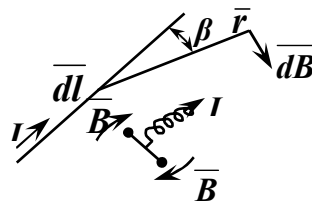


Рис. 1.4

Напрямок вектора магнітної індукції визначається відомим правилом правоходового гвинта, як показано на рис. 1.4.

### 3.5 Закон повного струму

Циркуляція вектора напруженості  $\vec{H}$  магнітного поля по контуру  $l$  (рис. 1.5) дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що охоплюються цим контуром:

$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \sum I, \quad (1.8)$$

де повний струм  $\sum I = wI$ ;  $w$  – кількість витків котушки, якою протікає струм  $I$ .

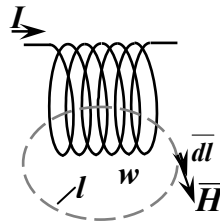


Рис. 1.5

### 3.6 Закон електромагнітної індукції

ЕРС  $e$ , яка індукується в контурі або в котушці (рис. 1.6), дорівнює швидкості зміни його магнітного потокозчеплення  $\psi$ :

$$e = -\frac{d\psi}{dt}, \tag{1.9}$$

де  $\psi = w \times \sum_{k=1}^w \Phi_k$ ;  $w$  – кількість витків котушки;  $\Phi_k$  – магнітний потік, який пронизує її  $k$ -ий виток.

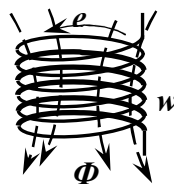


Рис. 1.6

У випадку, коли всі витки пронизуються одним магнітним потоком, ЕРС самоіндукції:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.10)$$

У загальному випадку для елемента  $dl$  провідника, який переміщується зі швидкістю  $V$  в магнітному полі з індукцією  $B$  (рис. 1.7), ЕРС має вираз:

$$dE = \vec{B} [\vec{dl} \times \vec{V}] \quad (1.11)$$

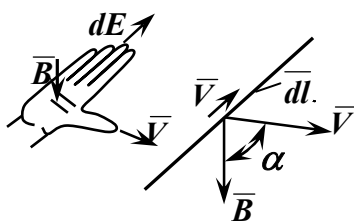


Рис. 1.7

Якщо при цьому магнітне поле однорідне, тобто індукція  $B$  скрізь однакова за величиною і напрямком, то ЕРС на всю довжину  $l$  провідника:

$$E = VBl \sin \alpha. \quad (1.12)$$

Напрямок ЕРС визначається правилом правої руки (рис. 1.7).

### 3.6 Закон Ампера

Закон Ампера (рис. 1.8) виражає силу Ампера, яка діє на елемент довжини  $dl$  провідника зі струмом  $I$ , що знаходиться в магнітному полі з індукцією  $B$ :

$$\overline{dF}_A = I [\overline{dl} \times \overline{B}], \quad (1.13)$$

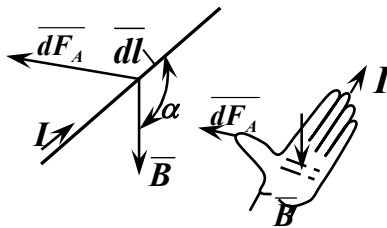


Рис. 1.8

У простішому випадку, при однорідному магнітному полі на всю довжину  $l$  провідника діє сила Ампера:

$$F_A = IBl \sin \alpha . \quad (1.14)$$

Напрямок сили Ампера визначається правилом лівої руки (рис. 1.8).

## ЛЕКЦІЯ №7.

# ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ. ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ

**Електрична машина постійного струму** – це електрична машина, призначена для перетворення механічної енергії в електричну постійного струму (генератор) або для зворотного перетворення (двигун).

**Двигуни постійного струму (ДПС) застосовують:** у промислових та транспортних електроприводах, пристроях автоматики, підйомних кранах, на прокатних станах, кранах важких виробництв, приводах з вимогами регулювання швидкості в широкому діапазоні та високим пусковим моментом, тягових електроприводах тепловозів, електровозів, теплоходів, кар'єрних самоскидів, електричних стартерах автомобілів, тракторів тощо.

Для зменшення номінальної напруги живлення в автомобільних стартерах застосовують двигун постійного струму з чотирма щітками. Завдяки цьому еквівалентний комплексний опір ротора зменшується майже в чотири рази. Статор такого двигуна має чотири полюси (дві пари полюсів). Пусковий струм в автомобільних стартерах становить близько 200 А. Режим роботи – короткочасний.

### **Переваги двигунів постійного струму:**

- простота будови та управління;
- практично лінійні механічна та регульовальна характеристики двигуна;
- легко регулювати частоту обертання;
- хороші пускові властивості – великий пусковий момент (найбільший пусковий момент у ДПС з послідовним збудженням);
- компактність по відношенню до інших двигунів (якщо використовувати сильні постійні магніти в статорі);

– можливість використання ДПС як в номінальному, так і в генераторному режимах через оборотність машин.

### Недоліки двигунів постійного струму:

- висока вартість;
- необхідність використання випрямлячів для живлення електродвигуна від мережі змінного струму;
- необхідність профілактичного обслуговування колекторно-щіткових вузлів;
- обмежений термін служби через зношення колектора.

Машина постійного струму оборотна, тобто конструкція електродвигуна постійного струму така сама, як і генератора постійного струму (рис. 7.1).

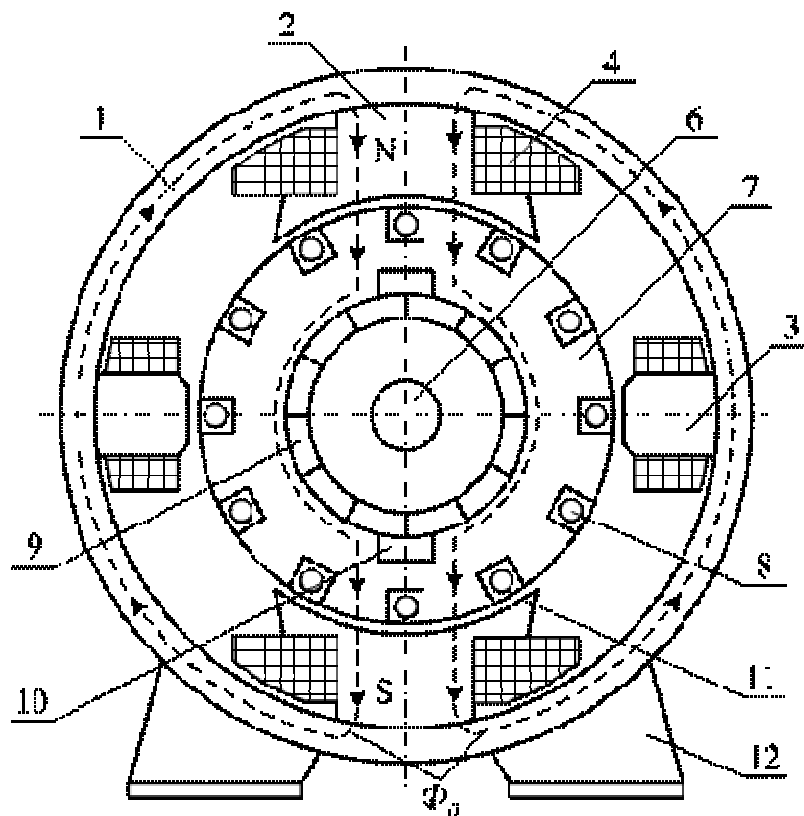


Рисунок 7.1 – Схема машини постійного струму

В електродвигуні явище електромагнітної індукції при взаємодії струму обмотки ротора (якоря) з основним магнітним полем зумовлює появу електромагнітного обертального моменту.

Дія генератора постійного струму ґрунтується на явищі електромагнітної індукції: збудженні змінної електрорушійної сили (ЕРС) в обмотці ротора (якоря), при його обертанні в основному магнітному полі, створюваному обмоткою збудження на полюсах.

Нерухома частина машини, яка називається статором (індуктором), складається з циліндричної станини (ярма) 1, до якої болтами кріпляться головні полюси 2 і додаткові полюси 3. Для зменшення магнітних втрат (втрат потужності від вихрових струмів і на перемагнічування) головні полюси виготовляються з окремих сталевих пластин. Додаткові полюси виготовляються суцільними або також набираються з пластин. На сердечниках головних полюсів розміщені котушки обмоток збудження 4, на додаткових полюсах – котушки 5 обмоток додаткових полюсів.

До ярма з обох торців болтами кріпляться підшипникові щити, в яких розташовані підшипники, що несуть вал 6 обертової частини машини, яка називається якорем. На валу закріплене осердя 7 якоря, який для зменшення магнітних втрат набирається з ізольованих одна від одної сталевих пластин. В пазах, розташованих на поверхні сердечника якоря, укладена обмотка 8. Обмотки якоря, збудження і додаткових полюсів виготовляють з мідних ізольованих проводів. Обмотка якоря складається з секцій, кінці яких приєднуються до розташованого на валу колектора 9.

Колектор – це циліндр, що складається з мідних пластин, ізольованих одна від одної і від вала. До колектора за допомогою пружин притискаються графітні, вуглеграфітні або металографітні щітки 10. Вони розташовані в щіткотримачах, закріплених на траверсі.

Обмотка збудження машини живиться постійним струмом і призначена для створення основного магнітного поля, показаного на рис. 1.1 умовно за допомогою двох ліній магнітної індукції (зображені штриховою лінією).

Головні полюси закінчуються полюсними наконечниками 11, що призначені для отримання на більшій частині окружності якоря однакового повітряного зазору між сердечником якоря і головними полюсами.



Додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками.

За допомогою колектора і щіток обертова обмотка якоря з'єднується з зовнішнім електричним колом.

На рис. 1.1 показана машина постійного струму з двома головними полюсами. В залежності від потужності та напруги машини постійного струму можуть мати і більшу кількість полюсів. При цьому відповідно збільшується кількість комплектів щіток і додаткових полюсів. Кріплення машини до фундаменту або металоконструкції здійснюється за допомогою лап 12.

Взаємодія струму  $I$  в обмотці якоря з магнітним потоком  $\Phi$ , який створюється обмотками, розташованими на полюсах машини, призводить у відповідності до закону Ампера, до виникнення електромагнітних сил, що діють на активні провідники обмотки, а отже електромагнітного моменту  $M$  :

$$M = k\Phi I, \quad (7.1)$$

де  $k$  – конструктивний параметр машини.

В провідниках обмотки якоря, що рухаються з кутовою швидкістю  $\omega$  в магнітному полі під дією моменту  $M$  у відповідності з законом Фарадея наводиться ЕРС обертання  $E$  :

$$E = k\Phi\omega, \quad (7.2)$$

яка спрямована в розглядуваному випадку на зустріч по відношенню до причини, яка викликала рух – ЕРС джерела живлення  $U$ .

У відповідності з другим законом Кірхгофа, для якірного кола машини справедливе рівняння:

$$U - E = IR. \quad (7.3)$$

Рівняння (7.1) – (7.3) – найпростіша, але достатня для розуміння головних процесів в електроприводі постійного струму модель. Для вирішення практичних задач вони повинні бути доповнені рівнянням руху з моментом втрат  $\Delta M$ , що входить в  $M_c$ :

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

а також рівняннями кола збудження для конкретної схеми електроприводу.

Розглянемо роль, яку відіграє ЕРС  $E$  в процесі перетворення енергії, що здійснюється електричною машиною. Якщо існував деякий усталений режим  $M_1 = M_{c1}$ , а потім  $M_c$  змінився, наприклад, зріс до величини  $M_{c2}$ , то для отримання нового усталеного режиму необхідно мати засіб, який змінив би  $M$ , привівши його у відповідність з новим значенням  $M_c$ . У двигуні внутрішнього згорання цю роль виконає оператор, збільшивши подачу палива; в паровій турбіні – спеціальний регулятор, який збільшить подачу пара. В електричній машині цю роль виконує ЕРС. Дійсно, у разі зростання  $M_c$  швидкість двигуна почне знижуватися, тоді зменшиться відповідно до (11) і ЕРС (за умови, що  $\Phi$ ,  $U$  та  $R$  сталі). Отже:

$$I = \frac{U - E}{R}.$$

Тому струм зросте, зумовлюючи тим самим зростання моменту. Двигун автоматично, без будь-яких зовнішніх впливів перейде в новий усталений режим. Такі процеси будуть мати місце при будь-яких величинах та знаках  $M_c$ , тобто ЕРС буде виконувати функцію регулятора, як у рушійному, так і в гальмівному режимах роботи машини.

## ЛЕКЦІЯ №8.

### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ. КЛАСИФІКАЦІЯ.

#### ПРИНЦИП ДІЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ.

#### НОМІНАЛЬНІ ДАНІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

**Електричні машини змінного струму поділяються на:** асинхронні та синхронні.

**Асинхронні електричні машини** – це електричні машини, в яких кутова швидкість обертання ротора не співпадає з кутовою швидкістю обертання магнітного поля статора. Відносну різницю цих частот називають ковзанням та вона залежить від навантаження.

**За виконанням ротора асинхронні електродвигуни поділяються на:** асинхронні електродвигуни з фазним ротором, асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором.

**За числом полюсів асинхронні електродвигуни поділяються на:** 2-ох полюсні – 3000 об/хв.; 4-ох полюсні – 1500 об/хв.; 6-ти полюсні – 1000 об/хв.; 8-ми полюсні – 750 об/хв.; 10-ти полюсні – 600 об/хв.; 12-ти полюсні – 500 об/хв.

**Принцип дії асинхронної машини.** Один із елементів машини – статор використовується для створення магнітного поля, що обертається з певною швидкістю, а в замкнутих провідних пасивних контурах іншого елемента – ротора наводяться ЕРС, які викликають протікання струмів та утворення сил (моментів) при їх взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному – асинхронному русі ротора відносно поля, що і дало машинам даного типу назву – асинхронні.

Статор, як правило, виконаний у вигляді декількох розміщених в пазах катушок, а ротор – у вигляді «білячої клітки» (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох катушок (фазний ротор), які з'єднані між собою, виведені на

кільця, що розміщені на валу, і з допомогою ковзаючих по ним щіток можуть бути замкнені на зовнішні резистори.

**Складність повного математичного опису процесів в асинхронній машині полягає в тому, що:**

1. Всі напруги, струми, потокозчеплення – змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами.

2. Взаємодіють контури, які рухаються, взаємне розміщення яких змінюється в просторі.

3. Магнітний потік нелінійно зв'язаний з струмом намагнічування (проявляється насичення магнітного кола), активні опори роторного кола залежать від частоти (ефект витіснення струму), опори всіх кіл залежать від температури тощо.

В загальному випадку для машини, що має  $p$  пар полюсів ( $p = 1, 2, 3, \dots$ ), синхронна кутова швидкість  $\omega_0$ , рад/с, тобто швидкість поля, визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (8.1)$$

для частоти обертання  $n_0$ , об/хв., будемо мати:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (8.2)$$

тобто, під час живлення від мережі  $f_1 = 50$  Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600 ... об/хв. в залежності від конструктивного виконання машини.

Вирази (8.1) та (8.2) мають принциповий характер: вони показують, що для даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість поля – змінювати частоту джерела живлення  $f_1$ .

**Процеси при  $\omega = \omega_0$ .** Нехай ротор обертається зі швидкістю  $\omega_0$ , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля і він не здійснює суттєвого впливу на процеси.

При грубому наближенні можна представити обмотку фази статора як деяку ідеальну котушку, до якої прикладена змінна напруга  $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$ . Як правило, напругу та інші змінні, що змінюються синусоїдально позначають великими літерами, якщо інтерес представляють їх діючі значення, або додають точку зверху, якщо розглядають вектори, що мають амплітуду  $U_m = \sqrt{2U}$  та фазу  $\varphi$ .

Прикладена напруга  $\dot{U}_1$  врівноважується ЕРС самоіндукції  $\dot{E}_1$  (рис. 8.1,а,б):

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об}, \quad (8.3)$$

де  $w_1$  – число витків обмотки;  $k_{об}$  – коефіцієнт, що залежить від конкретного виконання обмотки.

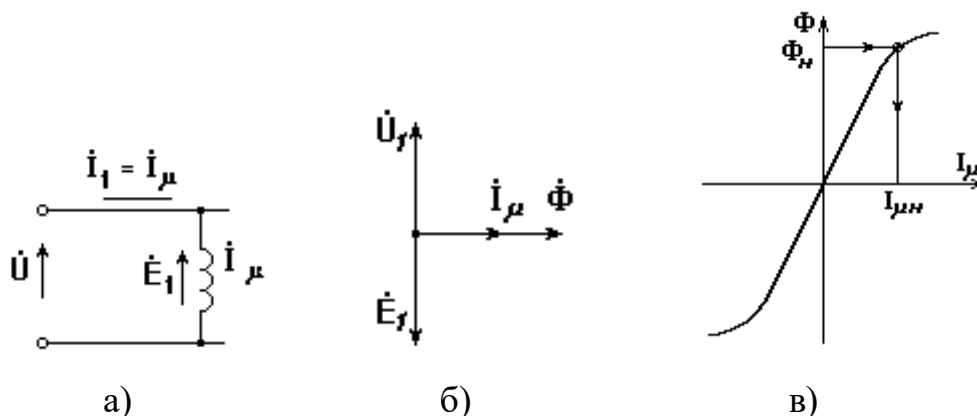


Рисунок 8.1 – Ідеалізована модель асинхронної машини при  $\omega = \omega_0$  (а), векторна діаграма (б) та крива намагнічення (в)

Наближено можна рахувати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою та параметрами обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}} \equiv \frac{U_1}{f_1}. \quad (8.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора – струм намагнічення визначається тільки магнітним потоком та характеристикою намагнічення машини (рис. 8.1,в):

$$I_1 = I_{10} = I_\mu.$$

В серійних машинах при  $U_1 = U_{1н}$  та  $f_1 = f_{1н}$ , тобто при номінальному магнітному потоці струм холостого ходу  $I_{10}$  складає, як правило, 30% – 40% від номінального струму статора  $I_{1н}$ .

#### **Процеси під навантаженням.**

При навантаженні вала  $\omega \neq \omega_0$  відмінність швидкостей  $\omega$  та  $\omega_0$  прийнято характеризувати ковзанням:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (8.5)$$

Тоді в роторному колі з'явиться ЕРС  $E'_2$ , що наведена по закону електромагнітної індукції та рівна:

$$E'_2 = E_1 \cdot s, \quad (8.6)$$

штрихом позначені приведені величини, що враховують неоднаковість обмоток статора та ротора. Частота наведеної ЕРС складає:

$$f_2 = f_1 \cdot s. \quad (8.7)$$

Струм  $I_2'$  в роторному колі, що має опір  $R_2'$  та індуктивність  $L_2'$ , знаходиться таким чином:

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2')^2}},$$

або після простих перетворень:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}}, \quad (8.8)$$

де  $X_2'$  – індуктивний опір розсіяння вторинного кола при частоті  $f_1$ .

Дане рівняння відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна – рис. 8.2, в якій враховані параметри статора  $R_1$  та  $X_1$ .

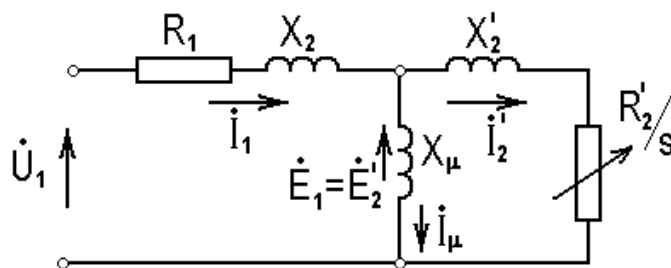


Рисунок 8.2 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна

**Номінальні дані.** На емблемі або в паспорті асинхронного двигуна, як правило, вказані номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток в зірку та

трикутник  $U_{1Y}/U_{H\Delta}$ , струми  $I_{1Y}/I_{1\Delta}$ , частота  $f_{1H}$ , потужність на валу  $P_H$ , частота обертання  $n_H$ , ККД  $\eta_H$ ,  $\cos\varphi_H$ .

Для двигунів з короткозамкненим ротором в каталозі приводяться кратності пускового струму  $k_I = \frac{I_{1п}}{I_{1H}}$ , пускового моменту  $k_M = \frac{M_{п}}{M_H}$ , критичного моменту  $\lambda = \frac{M_K}{M_H}$ , інколи – типові природні характеристики.

Для двигунів з фазним ротором вказується ЕРС на розімкнених кільцях загальмованого ротора  $E_{2H}$  при  $U_{1H}$  та номінальний струм ротора  $I_{2H}$ .

Приведених в каталозі даних недостатньо для визначення по них параметрів схеми заміщення та користуватися нею при всіх розрахунках, але по каталожним даним можна побудувати природну електромеханічну та механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками.

**Деяке представлення про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна отримати з наступних даних:**

- $s_H = 0,01 - 0,05$  (менші значення у двигунів більшої потужності – сотні кВт);
- $k_I = 5 - 7$ ;
- $k_M = 1,3 - 1,6$ ;
- $\lambda = 1,8 - 3,0$ .

Як випливає з цих даних, природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм, обмежені можливості керування координатами.

**Двигуни з короткозамкненим ротором** – найпоширеніші електричні машини – до недавнього часу використовувались лише в нерегульованому електроприводі, оскільки практично єдина можливість ефективно регулювати швидкість – змінювати частоту напруги, прикладеної до статорних обмоток. В наш час частотно-керований електропривод (рис. 8.3,а) є основним типом регульованого електропривода.



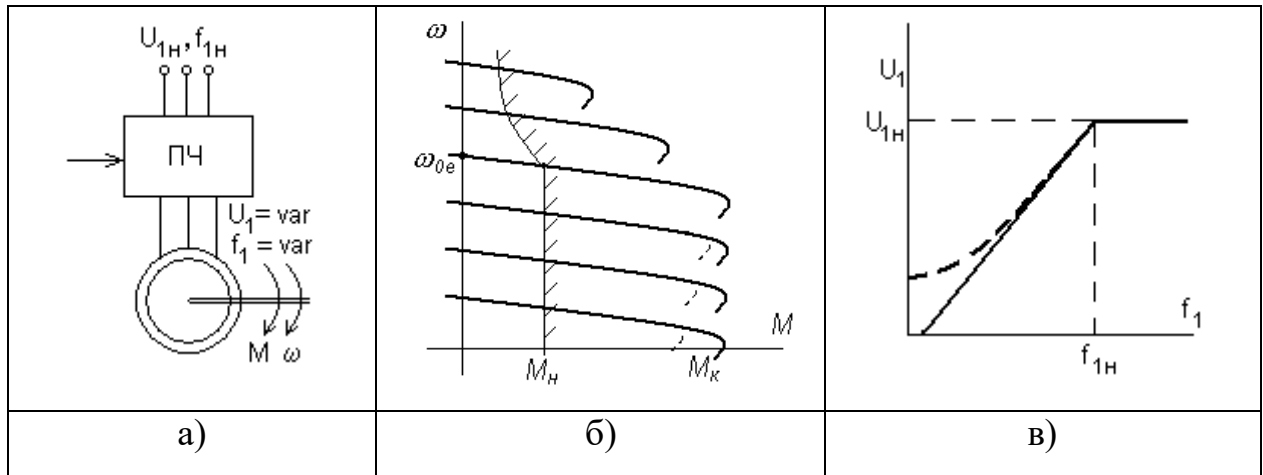


Рисунок 8.3 – Схема частотно-регульованого електропривода (а), механічні характеристики (б), залежність напруги від частоти (в)

**Частотне регулювання.** Як випливає з (8.1)  $\omega_0$  пропорційна частоті  $f_1$  та не залежить для даної машини від будь-яких інших величин. При цьому, змінюючи  $f_1$ , необхідно брати до уваги амплітуду напруги: при зменшенні  $f_1$  для збереження магнітного потоку на деякому, наприклад, номінальному рівні у відповідності з (8.4) необхідно змінювати  $E_1 \approx U_1$  так, щоб:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = \text{const.}$$

При збільшенні частоти від номінальної при  $U_1 = U_{1H}$  потік у відповідності з (8.4) буде зменшуватися.

Механічні характеристики при частотному регулюванні у разі припущення, що  $E_1 = U_1$ , показані на рис. 8.3,б.

Опір кола статора, яким ми нехтуємо, здійснює вплив на характеристики особливо малих машин (кВт) – пунктир на рис. 8.3,б, оскільки при зниженні частоти  $E_1 < U_1$ . Для компенсації цього впливу, як правило, трохи підвищують напругу на низьких частотах – пунктир на рис. 8.3,в.

**Оцінка частотного регулювання швидкості по введених раніше показникам:**

1. Регулювання двохзонне – вниз ( $\frac{U_1}{f_1} \approx const$ ) та вверх ( $U_1 = U_{1н}, f_1 > f_{1н}$ )

від основної швидкості.

2. Діапазон регулювання в розімкненій структурі (8–10):1. Стабільність швидкості – висока.

3. Регулювання плавне.

4. Допустиме навантаження:  $M = M_{н}$  – у разі регулювання вниз від основної швидкості ( $\Phi \approx const$ ),  $P = P_{н}$  – у разі регулювання вверх від основної швидкості ( $\Phi < \Phi_{н}$ ).

5. Спосіб економічний в експлуатації – немає додаткових елементів, що розсіюють енергію; малі втрати при перехідних процесах; гнучкість керування координатами в замкнутих структурах. Сучасні методи векторного керування забезпечують частотно-керованому електроприводу практично ті ж властивості по керованості, які має найідеальніший електропривод постійного струму.

6. Спосіб потребує використання перетворювача частоти (ПЧ) – пристрою, що керує частотою та амплітудою вихідної напруги.

## ЛЕКЦІЯ №15.

### ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ. ПРИЧИНИ УРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

**Електротравма** – травма, спричинена дією на організм людини електричного струму та (або) електричної дуги.

**Електротравматизм** – явище, що характеризується сукупністю електротравм.

Згідно зі статистичними даними, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають близько 1%, а в смертельному травматизмі – 15% і більше.

**На тяжкість ураження людини електричним струмом впливають чинники:** електричного характеру, неелектричного характеру, виробничого середовища.

**Основними чинниками електричного характеру, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом є:**

- величина струму, що проходить через тіло людини;
- напруга, під яку потрапляє людина;
- опір тіла людини;
- рід струму (постійний, змінний);
- частота струму.

**Величина струму**, що проходить через тіло людини безпосередньо і найбільше впливає на тяжкість ураження електричним струмом.

**За характером дії на організм виділяють:**

- **відчутний струм** – викликає під час проходження через тіло людини відчутні подразнення (значення порогового відчутного струму: для змінного струму частотою 50 Гц складає 0,6 – 1,5 мА; для постійного струму складає 5 – 7 мА);

– **невідпускаючий струм** – викликає під час проходження через тіло людини непереборні судомні скорочення м'язів руки, в якій затиснуто провідник (значення порогового невідпускаючого струму: 10 – 15 мА для змінного струму; 50 – 80 мА для постійного струму);

– **фібриляційний струм** – викликає під час проходження через тіло людини фібриляцію серця (значення порогового фібриляційного струму: в межах 100 мА для змінного струму; в межах 300 мА для постійного струму). Фібриляція – мимовільні неузгоджені скорочення волокон серцевого м'язу (фібрил), за яких серце не в змозі проганяти кров судинами.

**Гранично допустимий струм**, що проходить через тіло людини при нормальному (неаварійному) режимі роботи електроустановки не повинен перевищувати 0,3 мА для змінного струму та 1 мА для постійного струму.

**Величина напруги**, під яку потрапляє людина, впливає на тяжкість ураження електричним струмом в тій мірі, що зі збільшенням прикладеної до тіла напруги зменшується опір тіла людини, що призводить до збільшення тяжкості ураження.

**Шкіра** має найбільший вплив на опір тіла людини. **Опір шкіри** значно знижується у разі ушкодження її рогового шару, наявності вологи на її поверхні, збільшенні потовиділення та забрудненні. Крім цього, мають вплив щільність та площа контакту зі струмопровідними частинами, величина прикладеної напруги, величина струму та тривалість його дії, а також товщина та ступінь огрубіння верхнього шару шкіри.

Під час розрахунків та оцінки умов небезпеки ураження людини електричним струмом **опір тіла людини приймають рівним 1000 Ом**.

В діапазоні частот 0 ... 50 Гц збільшення частоти прикладеної напруги супроводжується зменшенням повного опору тіла людини та збільшенням значення струму, що проходить через нього. Подальше збільшення частоти, незважаючи на зростання струму, що проходить через тіло людини, не супроводжується зростанням небезпеки ураження.

Постійний струм викликає подразнення в тканинах тіла при замиканні та розмиканні струму, що проходить через людину. В проміжку часу між замиканням та розмиканням мережі постійного струму, його дія зводиться переважно до теплової. Змінний струм викликає більш тривалі інтенсивні подразнення за рахунок пульсації напруги. З цієї точки зору, змінний струм є небезпечнішим. Але ця закономірність зберігається до значень напруги 400 – 600 В, а при більшій напрузі постійний струм є більш небезпечним для людини.

**Основними чинниками неелектричного характеру, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом є:** шлях струму через тіло людини, індивідуальні особливості та стан організму людини, тривалість дії струму, його раптовість та непередбачуваність.

**Шлях струму через тіло людини** суттєво впливає на тяжкість ураження. Особливо небезпечним є проходження струму через життєво важливі органи з подальшим на них впливом.

**До індивідуальних особливостей організму належать:** чутливість організму до дії струму, психічні особливості та риси характеру людини.

**Зі збільшенням тривалості дії струму** зменшується опір тіла людини за рахунок зволоження шкіри від поту та електролітичних процесів в тканинах, поширюється пробій шкіри, послаблюються захисні сили організму, підвищується вірогідність збігу максимального імпульсу струму через серце з фазою кардіоциклу (фазою послаблення серцевих м'язів), що призводить до більш тяжких уражень.

**Вплив раптовості дії струму** на тяжкість ураження обумовлюється тим, що через несподіване потрапляння людини під дію електричного струму захисні функції організму не налаштовані на безпеку. Експериментально встановлено, що значення порогових струмів є на 30 – 50% вищими у разі усвідомлення людиною загрози ураження електричним струмом.

**Основними чинниками виробничого середовища, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом є:** температура повітря в

приміщенні, вологість, запиленість, наявність в повітрі хімічно активних домішок.

Протікання електричного струму через тіло людини супроводжується термічним, електролітичним та біологічним ефектами.

**Термічна дія струму** полягає в нагріванні тканин, випаровуванні вологи, що викликає опіки, обвугленні тканин та їх розриви паром. Тяжкість термічної дії струму залежить від величини струму, опору тіла та тривалості протікання струму.

**Електролітична дія струму** проявляється в розкладі органічної речовини, в тому числі і крові, що призводить до зміни її фізико-хімічних та біологічних властивостей. Це призводить до порушення біохімічних процесів в органах і тканинах, які є основою для забезпечення життєдіяльності організму людини.

**Біологічна дія струму** проявляється в подразненні та збуренні живих тканин організму, в тому числі на клітинному рівні. Через подразнюючу дію електричний струм може викликати мимовільне непередбачуване скорочення м'язів. Крім того, можлива рефлекторна дія електричного струму – через центральну нервову систему, що призводить до серйозних порушень діяльності життєво важливих органів.

**Електричні травми бувають:** місцевими, загальними та змішаними.

**До місцевих електротравм належать:** електричні опіки (поверхневі, внутрішні), електричні знаки, металізація шкіри, електроофтальмія та механічні ушкодження, пов'язані з дією електричної дуги.

**Залежно від умов виникнення електричні опіки поділяються на:** контактні, дугові та змішані.

**Електричні знаки** мають вигляд різко окреслених плям сірого або блідо-жовтого кольору на поверхні тіла людини в місці контакту зі струмопровідними елементами.

**Металізація шкіри** – це проникнення у верхні шари шкіри дрібних часток металу, який розплавився під дією електричної дуги.

**Електроофтальмія** – запалення зовнішніх оболонок очей, спричинене надмірною дією ультрафіолетового випромінювання електричної дуги. Електроофтальмія, як правило, розвивається через 2 – 6 год. після опромінення та проявляється у формі почервоніння, запалення шкіри, слизових оболонок повік, слъозоточіння, гнійних виділень, світлоболой та світлобоязні.

**Механічні ушкодження**, пов'язані з дією електричного струму на організм людини, спричиняються непередбачуваними судомними скороченнями м'язів у разі подразнюючої дії струму. Внаслідок таких судомних скорочень м'язів можливі розриви сухожиль, шкіри, кровоносних судин, нервових тканин, вивихи суглобів, переломи кісток тощо.

**Загальні електричні травми або електричні удари** – це порушення діяльності життєво важливих органів чи всього організму людини як наслідок збурення живих тканин організму електричним струмом, яке супроводжується мимовільним судомним скороченням м'язів.

**Залежно від наслідків ураження розрізняють чотири групи електричних ударів:**

I – судомні скорочення м'язів без втрати свідомості;

II – судомні скорочення м'язів із втратою свідомості без порушення дихання та кровообігу;

III – втрата свідомості з порушенням серцевої діяльності чи дихання або серцевої діяльності і дихання разом;

IV – клінічна смерть, тобто відсутність дихання та кровообігу.

**Причинами ураження електричним струмом можуть бути:**

– випадковий дотик до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою;

– дотик до не струмопровідних частин електроустановок, що випадково опинилися під напругою, внаслідок пошкодження ізоляції чи інших несправностей;

– попадання під напругу під час проведення ремонтних робіт на відключеному електрообладнанні через помилкове його ввімкнення;

– замикання кабелю на землю та виникнення крокової напруги тощо.

**Електробезпека** – система організаційних та технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики.

**Електроустановки** – машини, апарати, лінії електропередач та допоміжне обладнання (разом зі спорудами та приміщеннями, в яких вони розташовані), призначені для виробництва, перетворення, трансформації, передачі, розподілу електричної енергії та перетворення її в інші види енергії (Згідно з Правилами улаштування електроустановок).

#### **Правила електробезпеки:**

1. Виконувати роботу дозволено лише при повній відсутності напруги. Для цього необхідно здійснити відключення електроустановок від джерела живлення, вимкнувши автоматичні вимикачі в щитку.

2. Здійснити заходи, що усувають можливість вмикання апаратури.

3. Встановити знаки безпеки, огороження біля відкритих струмопровідних частин, до яких можливе доторкання людини.

4. Приєднати тимчасове переносне заземлення.

5. Працювати потрібно тільки в зручному одязі, що не сковує рухи.

6. При виконанні висотних робіт необхідно використовувати спеціально призначені для даних робіт козли та помости.

7. Працівники, які пов'язані з роботою в електроустановках повинні користуватися тільки якісними та цілими сертифікованими засобами індивідуального захисту, які повинні перевірятися оглядом перед кожним їх застосуванням, а також періодично через кожні 6...12 місяців.