



Національний університет
водного господарства та природокористування

Міністерство освіти та науки України
Національний університет водного господарства та природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

04-03-132

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №2 на тему
"Дослідження тягових електромагнітів"

з навчальної дисципліни

"Електротехніка та електромеханіка".

Ч.2. "Електромеханіка"

студентами спеціальності

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Рекомендовано науково-методичною
комісією зі спеціальності
151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
Протокол № 4 від 12. 10. 2016 р.

Рівне – 2016



Національний університет

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №2 на тему "Дослідження тягових електромагнітів" з навчальної дисципліни "Електротехніка та електромеханіка". Ч.2. "Електромеханіка" студентами спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / Маланчук Є.З., Христюк А.О. – Рівне : НУВГП, 2016. – 12 с.

Упорядники: Є.З. Маланчук, д.т.н., професор кафедри АЕКІТ;
А.О. Христюк, ст. викладач кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: В.В. Древецький, д.т.н., професор,
завідувач кафедри АЕКІТ.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Маланчук Є.З.,
Христюк А.О., 2016
© НУВГП, 2016



2.1. Мета роботи

Вивчити будову, принцип дії та дослідити тягові характеристики електромагнітів постійного та змінного струмів.

2.2. Короткі теоретичні відомості

Електромагніти є основою багатьох електротехнічних пристроїв. Вони дуже різноманітні за призначенням і конструктивним виконанням. Значна частина електромагнітів використовується для здійснення поступального або обертового переміщення, для створення утримуючої сили. Дія таких електромагнітів зумовлена силою взаємодії феромагнітного тіла з зовнішнім магнітним полем. Тому їх називають тяговими електромагнітами.

На рис. 2.1 зображено магнітне коло тягового електромагніта. Воно складається з намагнічуючої котушки 1; нерухомих частин (ярма) 2; і рухомої частини (якоря) 3. Ярма і якорь розділяє повітряний проміжок δ_0 .

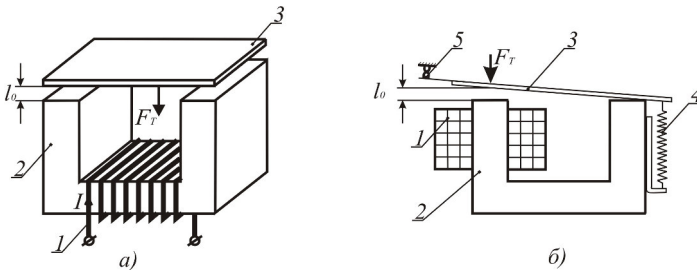


Рис. 2.1

При протіканні струму в котушці з кількістю витків W виникає намагнічуюча сила $F = IW$, яка збуджує магнітне поле (магнітний потік), магнітні силові лінії якого замикаються через нерухоме ярмо (магнітопровід), повітряний проміжок і якорь.

При цьому звернені одна до одної поверхні нерухомого ярма і рухомого якоря намагнічуються різнополярно і притягуються з силою

F_T яку називають тяговою електромагнітною силою, а пристрій - електромагнітом. Якір механічно зв'язаний з механізмом, який необхідно перемістити.

Другим прикладом електромагнітного механізму є реле струму (рис. 2.1,б), яке широко використовується в автоматичі. Реле складається з намагнічуючої котушки 1, ярма 2, якоря 3, протидіючої пружини 4 і електричних контактів 5. Електротягова сила F_T , що діє на якір в напрямку зменшення повітряного проміжку δ_0 , долаючи опір пружини 4, притягує якір до ярма. При цьому контакти 5 (група контактів) розмикаються, комутуючи відповідне електричне коло.

При зміні повітряного проміжку δ_0 змінюється магнітний опір магнітного кола R_μ , що призводить до зміни величини магнітного потоку

$$\Phi = \frac{IW}{R_\mu},$$

а значить і електротягової сили F_T . Залежність сили $F_T = f(g)$, де g – узагальнена координата положення рухомої частини (δ_0 , a тощо), які змінюються під дією цієї сили, називається тяговою характеристикою електромагніта. Електромагнітна тягова сила діє завжди в напрямку такої зміни координати g , при якій зменшується довжина силових ліній, при цьому одночасно зменшується магнітний опір R_μ кола електромагніта і збільшуються магнітний потік Φ , індуктивність котушки збудження та енергія магнітного поля.

В загальному випадку електромагнітна тягова сила при $I = const$ визначається за формулою

$$F_T = -\frac{\partial W}{\partial g},$$

де W – енергія магнітного поля електромагніта.

Для електромагніта, наведеного на рис. 2.1,а, величина тягової сили

$$F_T = -\frac{\partial W}{\partial l_0} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S'}, \quad [H] \quad /2.1/$$



де $B_0 = \frac{\Phi}{S}$ - магнітна індукція в повітряному проміжку, [Тл];

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна проникність повітря; S - площа взаємодії ярма і якоря, [м²]; Φ - магнітний потік між ярмом і якорем, [Вб].

Тягова сила, яка діє на яркі реле струму (рис. 2.1,б),

$$F_T = -\frac{\partial W}{\partial l} = 6.3 \cdot 10^{-7} (IW)^2 \frac{S}{\delta^2}, \quad /2.2/$$

і тягова характеристика має вигляд, наведений на рис. 2.2.

Змінюючи геометрію (конфігурацію) електромагнітів, формують їх тягові характеристики відповідно до вимог конкретного електромагнітного механізму.

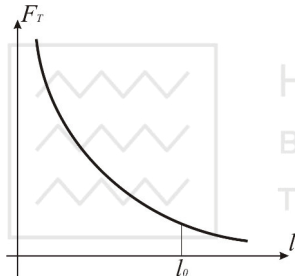


Рис. 2.2

Котушки електромагнітів можуть живитись як від постійного струму (електромагніти постійного струму), так і від джерела змінного струму (електромагніти змінного струму). Тягові характеристики і конструктивне виконання електромагнітів змінного і постійного струму мають суттєві відмінності.

Магнітний потік, який збуджується котушкою, по якій проходить неперіодичний змінний струм, теж періодично змінюється за величиною і напрямком. При синусоїдній формі напруги живлення котушки електромагніта струм в котушці також буде синусоїдним і магнітний потік

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$$

і згідно з формулою /2.1/ електромагнітна тягова сила

$$F_T(t) = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{\phi_m^2}{2\mu_0 S} \sin^2 \omega t. \quad /2.3/$$

На рис. 2.3 зображені електромагніт і графіки зміни в часі магнітного потоку і тягової сили. Із наведених графіків видно, що

тягова сила буде змінюватись (пульсувати) від нуля до максимального значення з подвійною частотою відносно частоти напруги живлення.

Зазвичай, переміщенню якоря електромагніта протидіє сила пружини F_n . В момент часу, коли сила $F_T > F_n$, ярк притягується до ярма, а коли $F_T < F_n$ пружина відтягує ярк. В результаті ярк рухається зворотно-поступально з подвійною частотою мережі і невеликою амплітудою, що супроводжується звуковим ефектом. Це явище використовують для створення електромагнітних вібраторів, електромолотів тощо.

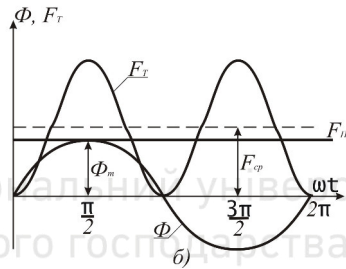
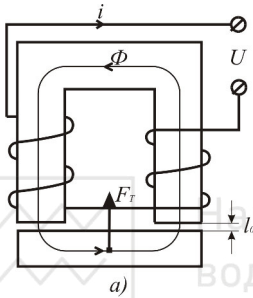


Рис. 2.3

Для усунення вібрацій в тягових електромагнітах застосовують

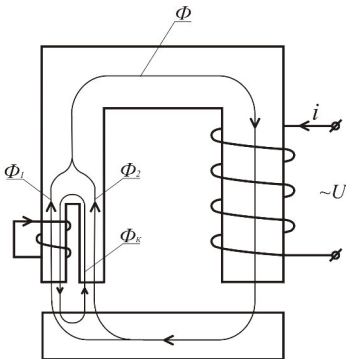


Рис. 2.4

тягових електромагнітах застосовують додаткові засоби, які унеможливають зменшення тягової сили нижче сили пружини. Одним із таких засобів є розчеплення одного з полюсів магнітопровода на дві частини і накладання на одну з них короткозамкнутого витка або декількох витків, як зображено на рис. 2.4. Часто короткозамкнуту обмотку виконують у вигляді мідного кільця і називають її екраном.

Для короткозамкнутого витка така: створений обмоткою збудження магніт-

ний потік $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ в розщепленому полюсі ділиться на потоки Φ_1 і Φ_2 . Магнітний потік Φ_1 , пронизуючи короткозамкнутий виток,



індукує в ньому електрорушійну силу взаємодукції

$$e_K = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\Phi_m \omega \cos \omega t$$

як у вторинній обмотці однофазного трансформатора в режимі короткого замикання. Ця е.р.с., зсунута в часі відносно потоку Φ_1 на кут $\pi/2$, зумовлює протікання струму

$$i_K = \frac{e_K}{Z_K}$$

де Z_K - повний опір короткозамкнутого витка. Цей струм великий, бо опір Z_K дуже малий. Протікання струму i_K супроводжується магнітним потоком Φ_K , який направлений проти потоку Φ_1 і співпадає з потоком Φ_2 . Магнітний потік Φ_K , зсунутий в часі відносно потоків Φ_1 і Φ_2 , бо е.р.с. e_K зсунута відносно Φ_1 на кут $\pi/2$. В результаті в розчепленій частині магнітного полюса створюються різні магнітні потоки як за амплітудою, так і за фазою. Зумовлені цими магнітними потоками тягові сили будуть пульсуючими, але їх нульові значення будуть зсунуті в часі. В результаті тягова сила електромагніта буде змінною, але мінімальні значення будуть більшими нуля. Підбором площ розчеплених частин полюса і параметрів короткозамкнутого витка добиваються того, що мінімальні значення результуючої тягової сили більші за силу пружини, як зображено на рис. 2.5.

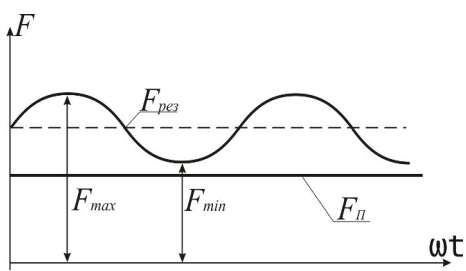


Рис. 2.5

Особливістю електромагнітів змінного струму на відміну від електромагнітів постійного струму є те, що струм в котушці збудження залежить від величини повітряного проміжку. Це зумовлено тим, що магнітний опір кола

$$R_\mu = R_{\mu F} + R_{\delta l} = \frac{l_F}{\mu_F S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}$$

де $R_{\mu F}$ - магнітний опір магнітопроводу; $R_{\mu \delta}$ - магнітний опір повітряного проміжку, μ_F - магнітна проникливість матеріалу, з якого виготовлений магнітопровід; μ_0 - магнітна проникливість



повітря, яку приймають рівною магнітній проникливості вакууму;
 S - площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Оскільки магнітна проникливість листової електротехнічної сталі, з якої виготовлений магнітопровід, значно більша μ_0 [$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $\mu_F = \mu_0(10^2 \dots 10^5)$], то можна вважати, що магнітний потік обернено-пропорційний величині повітряного проміжку згідно закону Ома для магнітного кола $\left(\Phi \approx \frac{F}{R_{\mu\delta}} = \frac{F}{\delta} \mu_0 S \right)$.

Отже, великому (початковому) повітряному проміжку буде відповідати мінімальний магнітний потік, мінімальним буде індуктивний опір котушки $x_{L\min} = L_{K\min} \omega$ і максимальним буде струм

$$I_{\max} = \frac{U}{Z_K} = \frac{U}{\sqrt{r_K^2 + x_{L\min}^2}}, \quad /2.4/$$

де U - напруга живлення котушки.

По мірі зменшення повітряного проміжку магнітний потік і відповідно опір котушки будуть збільшуватись, а струм в котушці – зменшуватись. Відношення початкового струму ($\delta = \delta_0$) до усталеного ($\delta = \theta$)

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 10 \dots 15. \quad /2.5/$$

Співвідношення /2.5/ показує, що тривале живлення електромагнітів змінного струму при розімкненому магнітопроводі ($\delta \neq 0$) призведе до перегріву котушки. Перегріву котушок збудження електромагнітів постійного струму не буває, оскільки струм не залежить від повітряного проміжку.

2.3 Програма роботи

1. Ознайомитись з будовою Ш-подібного електромагніта і магніта соленоїдного типу



2. Зняти тягові характеристики $F = f(\delta)$ Ш-подібного електромагніта при живленні котушки збудження від джерела постійної і змінної напруги.

3. Зняти тягові характеристики $F = f(\delta)$ електромагніта з внутрішнім лінійним переміщенням при живленні котушки збудження від джерела постійної і змінної напруги.

4. Зробити порівняльний аналіз отриманих результатів.

2.4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з Ш-подібного електромагніта з лінійним переміщенням якоря та електромагніта соленоїдного типу, пружинного динамометра, набору немагнітних каліброваних прокладок, джерел живлення постійного і змінного струмів та вимірювальних приладів.

Електрична схема під'єднання Ш-подібного електромагніта до джерела живлення змінного струму наведена на рис. 2.6.

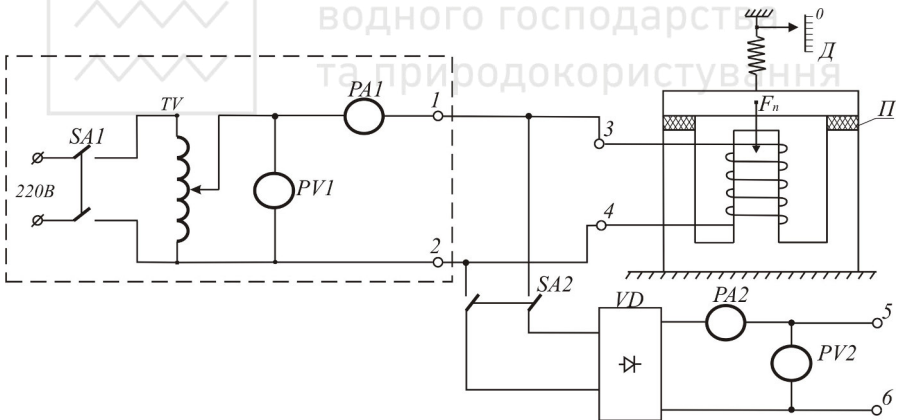


Рис. 2.6.

Частина схеми, виділена на рис. 2.6. пунктирними лініями, розміщена на лабораторному столі. Вона складається із вимикача $SA1$, лабораторного автотрансформатора TV , вольтметра $PV1$ і амперметра $PA1$. До клем 1-2 під'єднують котушку досліджуваного електромагніта при живленні його змінним струмом. На переносному стенді розташовані два електромагніти з пристроями вимірювання сили тяги, перемикач $SA2$, випрямляч VD , набір немагнітних

прокладок P_1 , амперметр PA_2 для вимірювання постійного струму та клем 5-6 для під'єднання котушок електромагнітів при живленні їх постійним струмом.

2.5. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з конструкціями Ш-подібного і соленоїдного електромагнітів та з пристроями вимірювання сили тяги. Під'єднати до клем 1-2, які розташовані на панелі лабораторного стола, вимикач SA_2 і котушку Ш-подібного електромагніта. Після перевірки електричної схеми викладачем приступають до проведення експериментів.

2. Тягові характеристики Ш-подібного електромагніта $F_T = f(\delta)$ при живленні котушки збудження змінним і постійним струмом знімають у такій послідовності:

- ручку автотрансформатора TV переводять в нульове (крайне ліве) положення і вмикають вимикач SA_1 ;

- плавно збільшують напругу на виході автотрансформатора TV до тих пір, поки якір не притягнеться до ярма, при цьому пружина динамометра не повинна натягуватись. Покази амперметра PA_1 і вольтметра PV_1 заносять в табл. 1. Потім за допомогою важеля плавно збільшують силу тяги пружинного динамометра доти доки якір не відірветься від ярма. В цей момент за шкалою визначають силу тяги динамометра F_δ , яка буде дорівнювати силі тяги електромагніта F_T . Силу F_δ фіксують в кг, а потім перераховують її в ньютони за формулою $F_T = gF_\delta$, де $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Ці дані заносять в табл. 1;

- потім ручку автотрансформатора знову переводять в нульове положення і вмикають вимикач SA_1 ; котушку електромагніта відмикають від клем 1-2 і під'єднують до клем 5-6; вмикають вимикачі SA_1 і SA_2 і далі плавно збільшують напругу автотрансформатором доти, доки не притягнеться якір до ярма. Покази амперметра PA_2 і вольтметра PV_2 заносять в табл. 1. Після цього визначають силу відриву якоря від ярма, перераховують її у ньютони і ці дані заносять в табл. 1.

При цих експериментах повітряний проміжок $\delta = 0$.



| № п/п | δ , мм | Змінний струм | | | | | Постійний струм | | | | | x_L Ом |
|----------|------------------|---------------|------------|----------------------|--------------|---------------|-----------------|------------|----------------------|--------------|---------------|-------------|
| | | U , В | I , А | F_{δ} , кг | F_T , Н | Z_K , Ом | U , В | I , А | F_{δ} , кг | F_T , Н | r_K , Ом | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,5 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 1,0 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2,0 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 3,0 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 4,0 | | | | | | | | | | | |

Крім того, вираховують повний опір котушки електромагніта $Z_K = \frac{U}{I}$, опір при постійному струмі $r_K = \frac{U}{I}$, а також індуктивний

$$\text{опір } x_L = \omega L = 50 \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}.$$

Наступну точку характеристик визначають для $\delta = 0,5$ мм. Для цього калібровані пластини товщиною 0.5 мм встановлюють в проміжки між якорем і ярмом так, як зображено на рис. 2.6, і дослід повторюють за вищенаведеною методикою. Аналогічно знімають точки тягових характеристик для $\delta = 1.0; 2.0; 3.0$ і 4.0 мм.

За даними експериментів і розрахунків в одних координатах будують залежності $F_T = f(\delta)$ при живленні котушок електромагнітів постійним і змінним струмом і характеристику $x_L = f(\delta)$. За видом цієї характеристики зробити висновок про зміну струму при спрацюванні електромагніта.

3. Тягові характеристики електромагніта соленоїдного типу знімають також при живленні котушки збудження постійним і змінним струмом за методикою, описаною вище. Натяг пружини динамометра здійснюють за допомогою гвинта і гайки. Дані вимірювань і обчислень заносять в табл. 2.

За даними табл. 2 в одних координатах будують характеристики $F_T = f(\delta)$ при живленні котушки електромагніта постійним і змінним струмом, а також залежність $F_T = f(I_K)$.



| № п/п | δ , мм | Змінний струм | | | Постійний струм | | |
|-------|---------------|---------------|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| | | I_k , А | F_g , кг | F_T , Н | I_k , А | F_g , кг | F_T , Н |
| 1 | 0 | | | | | | |
| 2 | 0,5 | | | | | | |
| 3 | 1,5 | | | | | | |
| 4 | 3 | | | | | | |
| 5 | 6 | | | | | | |
| 6 | 10 | | | | | | |

За даними досліджень роблять висновки про відмінності роботи електромагнітів при живленні їх котушок збудження постійним і змінним струмами.

2.6. Контрольні запитання

1. Яку залежність відображає тягова характеристика електромагніта?
2. Який вид має тягова характеристика електромагніта?
3. Для чого необхідно знати тягові характеристики електромагнітів?
4. Чому при живленні котушки електромагніта змінним струмом сила тяги не змінює свого напрямку?
5. З якою метою магнітопроводи електромагнітів змінного струму виконують з тонкої листової електротехнічної сталі?
6. Що може бути причиною виникнення вібрації якоря в електромагнітах змінного струму?
8. Від чого залежить струм в котушці електромагніта змінного струму?
9. Від чого залежить струм в котушці електромагніта постійного струму?
10. Чому після виключення електромагніта його якір рухається зі змінним прискоренням?