

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт

з курсу

СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт курсу «Спеціальні електричні машини (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : О. М. Петренко, В. І. Колотіло, Н. П. Лукашова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 39 с.

Укладачі: О. М. Петренко,
В. І. Колотіло,
Н. П. Лукашова

Рецензент д-р техн. наук, проф. Я. В. Щербак

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 7 від 20.02.2016.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота 1.....	5
Лабораторна робота 2.....	12
Лабораторна робота 3.....	17
Лабораторна робота 4.....	24
Лабораторна робота 5.....	30
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	39

ВСТУП

Робочі місця обладнані плакатами принципів схем, таблицями номінальних та допустимих значень параметрів, правилами техніки безпеки.

Тривалість однієї лабораторної роботи складає 4–6 годин.

Перед початком занять викладач знайомить студентів з порядком зміни робочих місць, загальною організацією проведення і оформленням роботи, основними правилами техніки безпеки. Особлива увага приділяється підготовці студентів до занять, перевірки їх знань принципів схем, котрі вони повинні досліджувати.

Студенти повинні вдома готуватися до лабораторної роботи, усвідомити цілі і задачі її проведення, ознайомитися з рекомендованою літературою.

В заключній частині виконання лабораторної роботи студент оформлює звіт в робочому зошиті, в якому повинна міститися письмова відповідь на ті запитання, які були поставлені даній підгрупі викладачем. Також можуть бути наведені принципові схеми електрообладнання в одному з режимів його роботи при відповідному положенні контролера керування. По кожній лабораторній роботі студент повинен отримати залік у викладача з підписом і датою. Перед складанням іспитів зошити з проставленими заліками здаються викладачеві, що приймає іспит.

Особливістю проведення циклу робіт є поки що дві можливі установки, причому на одній з них (стенд на взаємне навантаження) виконуються 4 із 5 робіт. Тому бажано на початку семестру узгоджувати проведення лабораторії з курсу із іншими курсами, як, наприклад, «Основи теорії електричної тяги», або «Електричне обладнання рухомого складу», які одночасно викладаються для 7-го семестру навчання студентам стаціонару. Це дало б змогу проводити роботи погрупно по 4–5 студентів, чергуючи виконання всього циклу.

Проведення робіт 1, 2 і 4 варто сполучити, бо програма дослідів в них в більшій частині збігається, тоді об'єм роботи 1 можна розбити на 2 заняття, а саме на першому занятті провести дослід із шунтуванням обмотки збудження, а на другому – дослід без шунтування обмоток, саме ці дослідів є збіжними для обох робіт 1 і 2.

Лабораторна робота 1

«Властивості тягових двигунів з послідовним збудженням»

Тема 1 Нормативні вимоги та експлуатаційні особливості
тягових електродвигунів (11 годин)

Ціль роботи: дослідження властивостей та характеристик двигуна з послідовним збудженням у режимах тяги, робота на штучних характеристиках у режимі послаблення поля збудження.

Теоретичні відомості: Двигуни з послідовним збудженням знаходять широке застосування в якості тягових двигунів, тому головним класом «спеціальних» машин, які розглядає даний курс слід вважати саме цей тип двигунів.

Вигляд електромеханічних та механічних характеристик цих двигунів визначається за кривою їхнього намагнічування, яку поділяють умовно на ділянку ненасиченого стану, що відповідає лінійній залежності між магнітним потоком двигуна та струмом збудження (який є повністю чи частково струмом навантаження) : $\Phi = \kappa_{\Phi} I_{\phi}$, та ділянку де суттєво впливає насичення магнітного кола (рис. 1).

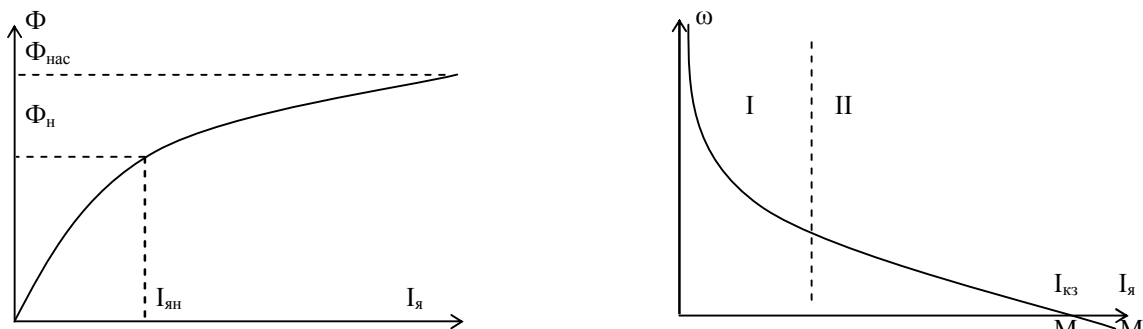


Рисунок 1 – Вигляд електромеханічних та механічних характеристик двигунів

В зоні 1 вигляд характеристики подібний до гіперболи, а в зоні 2 – при достатньому насиченні де можна вважати потік збудження незмінним $\Phi_{нас}$, характеристика подібна до лінійної.

Із припущенням лінійної залежності магнітного потоку від струму навантаження (ненасичений режим 1) аналітично характеристики двигуна можна представити як:

$$n = \frac{30 \times U}{ck_{\Phi} \pi \times I} - \frac{30}{\pi} \times \frac{R_a}{ck_{\Phi}},$$

$$n = \frac{30 \times U}{\pi \times \sqrt{ck_{\Phi}} \times \sqrt{M}} - \frac{30}{\pi} \times \frac{R_a}{ck_{\Phi}}, \quad c = \frac{pN}{2\pi \times a}$$

Особливістю характеристик є неприпустимість холостого ходу, коли частота обертання сильно зростає («рознос» двигуна). Робочими ділянками є ділянки навантаження, тому в робочих режимах часто характеристика наближена до лінійної, але на відміну від двигунів із незалежним або паралельним збудженням завдяки послідовній обмотці збудження цей двигун має сильний позитивний зворотній зв'язок за струмом, що дає змогу компенсувати розмагнічувальну дію реакції якоря, тому електромагнітний момент цих машин вищий у порівнянні із машинами паралельного збудження.

Загалом, характеристику двигуна з послідовним збудженням представляють чисельно у вигляді таблиці і всі розрахунки характеристик мають табличні алгоритми. Найпоширенішим методом роботи із характеристиками є метод, що спирається на «універсальну» характеристику двигуна у відносних одиницях. Природна характеристика витікає з універсальної її перерахуванням через відповідні номінальні величини (струм, момент, частоту обертання, тощо), а штучні характеристики обчислюються через *формулу перерахунку*:

$$n_i = n_e \times \frac{E_i}{E_e}.$$

Основним засобом регулювання швидкості тягових моторів є ослаблення поля, яке досягається шунтуванням обмотки збудження. Тому штучні характеристики для ослаблення поля є найбільш вживаними у тязі і досліджуються у даній роботі разом із природною.

ЕРС E_i для користування формулою перерахунку обчислюється як:

$$E_i = U - I_{нагр} \times \frac{R_{ш} R_{возб}}{R_{ш} + R_{возб}}, \text{ де}$$

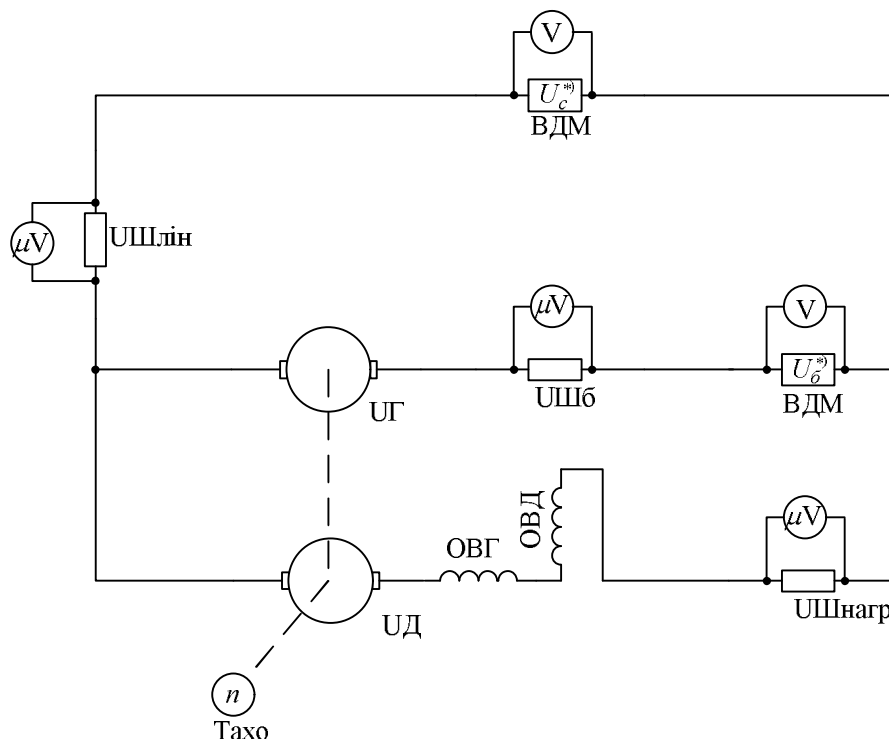
$$I_{нагр} = I_{возб} + \frac{I_{возб} R_{возб}}{R_{ш}}.$$

Підготовка до проведення роботи:

1. Повторити теоретичний матеріал, стосовно двигунів послідовного збудження, користуючись літературою та конспектом лекцій.
2. Ознайомитись із схемою взаємного навантаження тягових двигунів.
3. Ознайомитися із розрахунковими даними стендових двигунів ТЕ-022, наведених у доданку.
4. Підготувати бланк звіту з проведення лабораторної роботи, використовуючи ці методичні вказівки

Робоче завдання до проведення роботи

Частина I 1. Зібрати схему, згідно до рисунку



$UШ$ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 2 – Схема взаємного навантаження тягових двигунів

2. Під керівництвом викладача (лаборанта) здійснити запуск схеми (двигунів на взаємне навантаження).

– встановити певний рівень напруги живлення від мережі (U_c);

– змінюючи напругу бустера (ВДМ) зняти не менше чотирьох точок, при цьому напругу мережі слід підтримувати за первинному рівні (підрегулювати);

– дані занести у бланк :

Напруга мережі: $U_c =$

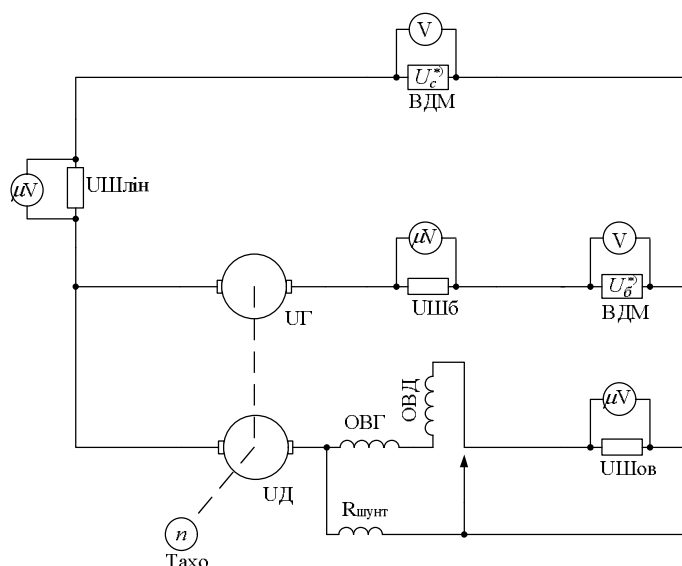
Струм лінії, А	Струм бустера, А	Струм навантаження, А	Напруга бустера, В	Частота обертання, об/в	Напруга на затискувачах двигуна, В

– встановити другий рівень напруги живлення від мережі (U_c);

– повторити дослід для цього рівня напруги із занесенням даних досліду у подібний бланк.

Частина 2

3. Зібрати схему із шунтуванням обмоток збудження, як на наведеному рисунку.



$UШ$ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 3 – Схема із шунтуванням обмоток збудження

4. Під керівництвом викладача (лаборанта) здійснити запуск схеми (двигунів на взаємне навантаження).

– встановити певний рівень напруги живлення від мережі (U_c);

– змінюючи напругу бустера (ВДМ) зняти не менше чотирьох точок, при цьому напругу мережі слід підтримувати за первинному рівні (підрегулювати);

– дані занести у бланк:

Напруга мережі: $U_c =$

Струм лінії, А	Струм бустера, А	Струм навантаження, А	Струм збудження, А	Напруга бустера, В	Частота обертання, об/в

– встановити другий рівень напруги живлення від мережі (U_c);

– повторити дослід для цього рівня напруги із занесенням даних досліду у подібний бланк.

Обробка результатів

1. Безпосередньо на підставі даних експерименту побудувати на аркуші міліметрівки штучні електромеханічні (швидкісні) характеристики двигуна ТЕ-022 для двох значень напруги мережі.

2. Користуючись розрахунковими даними двигуна, провести розрахункову перевірку цих характеристик.

Методика розрахунку:

2.1 Характеристика намагнічування двигуна:

Поток, Мкс	1.05Φ _н = 1713800.44		1.00Φ _н = 1632190.90	
Індукція, Гс	МДС, А		Індукция, Гс	МДС, А
Повітряний проміжок	6438.02	1941.93	6131.45	1849.46
Зубці	12856.52		12244.30	
	16836.02		16034.31	
	24383.49	619.12	23222.37	429.72
Осердя якоря	10738.91	30.22	10227.53	26.70

Осердя полюса	10933.34	28.17	10412.70	24.98
Полюсний башмак	7133.39	0.00	6793.71	0.00
Станина	10939.15	229.82	10418.24	220.57
Проміж у станини	10933.34	415.47	10412.70	395.68
Сумарна МДС,А		3264.74		2947.11

Струм, А =МДС/ число витків збудження.

Поток, Мкс	0.8 Φн= 1305752.72		0.5 Φн= 816095.45	
Повітряний проміжок	4905.16	1479.57	3065.72	924.73
Зубці	9795.44		6122.15	
	12827.44		8017.15	
	18577.90	74.58	11611.19	7.63
Осердя якоря	8182.02	16.80	5113.76	8.97
Осердя полюса	8330.16	15.55	5206.35	8.17
Полюсний башмак	5434.96	0.00	3396.85	0.00
Станина	8334.59	198.35	5209.12	170.59
Проміж у станини	8330.16	316.55	5206.35	197.84
Сумарна МДС		2101.40		1317.93

Струм, А =МДС/ число витків збудження.

Число витків обмотки збудження: $w_g = 20$.

2.2 Природна швидкісна характеристика розрахована за даними 2.1

$$n = \frac{30}{\pi} \times \frac{U_n - I \times R_a}{c\Phi}, c = \frac{pN}{2\pi \times a}, p = 2, N = 290, a = 1, R_a = 0.128 \text{ Ом}, U_n = 300 \text{ В}.$$

Слід зазначити, що в наведеній таблиці дані потоку в Мкс слід перевести в Вб через коефіцієнт 10^{-8} , а дані індукції в Гс перевести в Тл через коефіцієнт 10^{-4} , що відповідає системі Сі.

2.3 На аркуші міліметрівки побудувати природню розраховану швидкісну характеристику.

2.4 Користуючись формулою перерахунку $n_i = n_e \times \frac{E_i}{E_e}$ побудувати штучні

характеристики для умов експерименту. Значення E_i визначити

$$E_i = U - I_{нагр} \times \frac{R_{ш} R_{возб}}{R_{ш} + R_{возб}}, де$$

$$I_{нагр} = I_{возб} + \frac{I_{возб} R_{возб}}{R_{ш}}.$$

при відсутності шунтування відповідний опір не враховується, тобто

$$E_i = U - I_{нагр} \times R_{возб}, де$$

$$I_{нагр} = I_{возб}$$

Обробку даних рекомендується провести за допомогою електронних таблиць EXCEL.

Контрольні питання

1. Чим небезпечне швидке скидання напруги для двигуна з послідовним збудженням?
2. Чим пояснюється широке застосування двигунів з послідовним збудженням у режимах тяги?
3. Поясніть механізм небезпечного зростання частоти обертання двигуна при малому навантаженні.
4. Поясніть поведінку штучних характеристик при шунтуванні обмотки збудження.
5. Як здійснити режим рекуперативного гальмування двигуна з послідовним збудженням?
6. Як здійснюється режим динамічного гальмування двигуна з послідовним збудженням?

Лабораторна робота 2

«Визначення втрат потужності у двигунах»

Тема 2 Якірні обмотки двигунів постійного струму.

Їхні властивості та розрахунок (18 годин)

Ціль роботи: освоєння методів обчислення втрат потужності у двигунах, методів розділення втрат, обчислення ККД.

Теоретичні відомості: Втрати потужності поділяються за кількома критеріями:

- на постійні та змінні;
- пропорційні квадрату струму, лінійно залежні від струму та незалежні від струму;
- головними втратами у двигуні постійного струму є втрати в обмотках якірного кола, втрати у сталі якоря, електричні втрати на колекторі, механічні та вентиляційні, додаткові.

Баланс потужності у машині складається

$$P_1 = UI = P_2 + \sum \Delta p$$

де P_1 – споживана потужність, P_2 – корисна потужність, $\sum \Delta p$ – втрати потужності.

$$\text{ККД машини } \epsilon \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum \Delta p}{UI}.$$

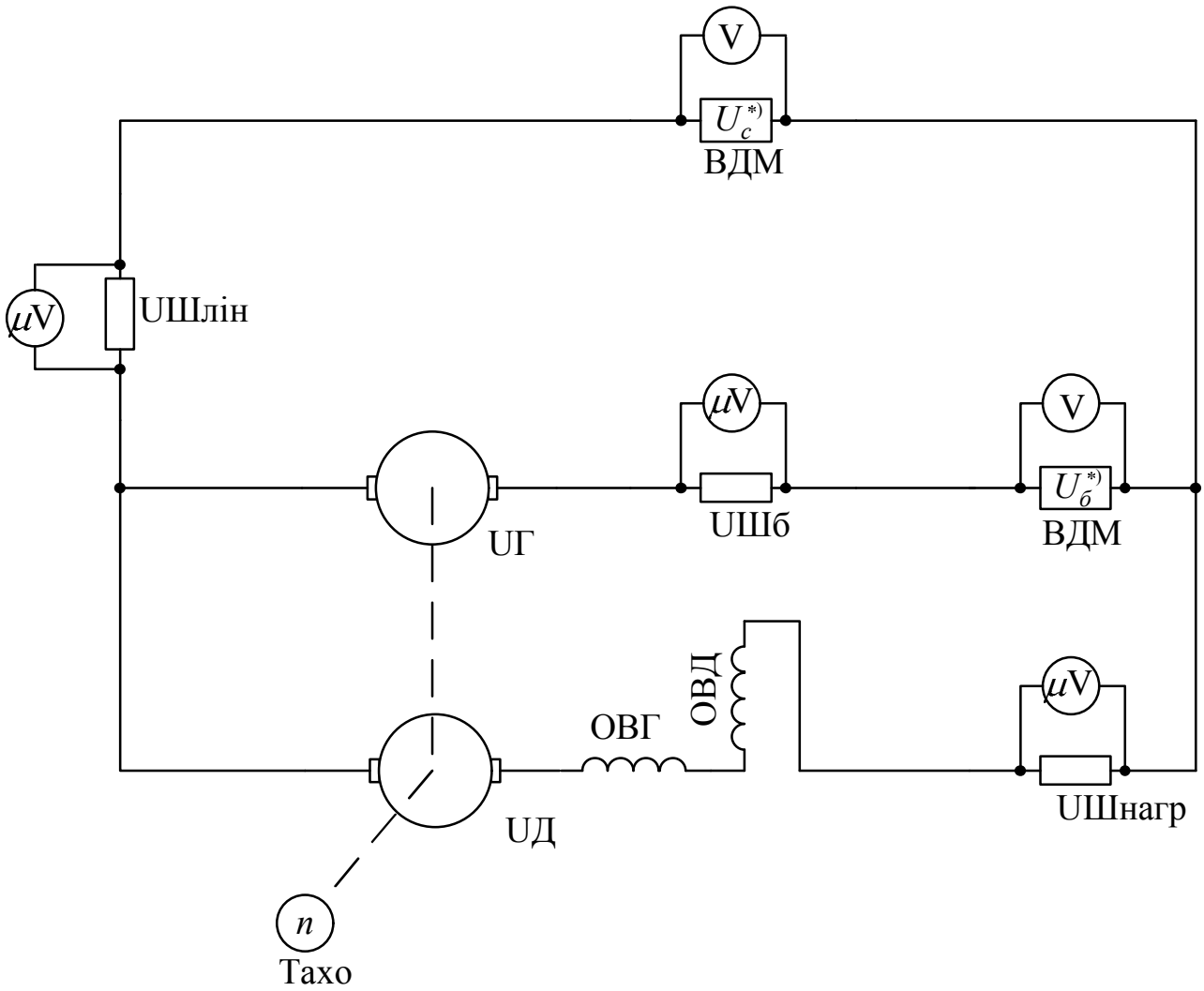
- потужність, яка споживається із джерела мережі (U_c) покриває механічні втрати двох випробовуваних машин, або дорівнює подвоєним механічним втратам випробовуваного двигуна, тобто

$$U_c I_c = 2p_{\text{мех}},$$

шті втрат, тобто

$$0.5 \times U_{BDM} I_{BDM} = IR_a^2 + p_{cm} + I \Delta U_{\text{щ}} + p_{\text{доб}}.$$

(див. рис. 4):



UШ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 4 – Випробування двигунів на взаємне навантаження

Підготовка до проведення роботи:

1. Повторити теоретичний матеріал, стосовно двигунів послідовного збудження, користуючись літературою та конспектом лекцій.
2. Ознайомитись із схемою взаємного навантаження тягових двигунів.
3. Ознайомитись із розрахунковими даними стендових двигунів ТЕ-022, наведених у доданку.
4. Підготувати бланк звіту з проведення лабораторної роботи, використовуючи ці методичні вказівки.

Робоче завдання до проведення роботи:

Під керівництвом викладача (лаборанта) здійснити запуск схеми (двигунів на взаємне навантаження):

- встановити певний рівень напруги живлення від мережі (U_c);
- змінюючи напругу бустера (ВДМ) зняти не менше чотирьох точок, при цьому напругу мережі слід підтримувати за первинному рівні (підрегулювати);
- дані занести у бланк:

Напруга мережі: $U_c =$

Струм лінії, А	Струм бустера, А	Струм навантаження, А	Напруга бустера, В	Частота обертання, об/в	Напруга на затискувачах двигуна, В

- встановити другий рівень напруги живлення від мережі (U_c);
- повторити дослід для цього рівня напруги із занесенням даних дослідів у подібний бланк.

Обробка результатів :

Для кожної точки визначити:

Споживана потужність P_1

$$P_1 = UI ;$$

Механічна потужність

$$0.5 \times U_c I_c = p_{\text{мех}} ;$$

Втрати потужності в обмотках якорного кола:

$$p_{\text{эл}} = I^2 R_a, R_a = 0.128 \times (1 - 0.004(115 - t_{\text{обм}})),$$

де $t_{\text{обм}}$ – температура обмотки, яка відрізняється від розрахункової температури для класу ізоляції 115°. Якщо випробування проводяться на холодному двигуні, її можна прийняти 40°, тоді $R_a = 0.09 \text{ Ом}$.

додаткові втрати визначаються згідно ГОСТ як

$$p_{\text{доб}} = 0.003 \times P_1 ;$$

втрати потужності у щітковому контакті

$$I \Delta U_{\text{щ}} = 0.35 \times I ;$$

втрати у сталі

$$p_{\text{ст}} = 0.5 \times U_{\text{ВДМ}} I_{\text{ВДМ}} - I R_a^2 - I \Delta U_{\text{щ}} - p_{\text{доб}} ;$$

Сума втрат

$$\sum \Delta p = 0.5 \times U_{\text{ВДМ}} I_{\text{ВДМ}} + 0.5 \times U_c I_c ;$$

Корисна потужність

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta p ;$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum \Delta p}{UI} .$$

Побудувати залежність ККД від струму навантаження $\eta(I)$.

Контрольні питання

1. Які втрати потужності мають місце у машині постійного струму?
2. Яка залежність кожного виду втрат від струму навантаження?
3. У яких випадках враховуються втрати у обмотці збудження?
4. Що таке додаткові втрати і як вони враховуються?
5. Чому вважаються втрати у осерді полюсів і станини рівними нулю?
6. Які з втрат найбільші у балансі потужності?
7. Які умови максимуму ККД машини?

Лабораторна робота 3

«Комутаційні дослідження тягових двигунів»

Тема 6 Порухення комутації в стаціонарних режимах роботи двигунів та методи експериментального дослідження машин на стенді

Ціль роботи: Проведення комутаційних випробувань тягового двигуна із визначенням його області безіскрової роботи (ОБР) та її аналізом.

Теоретичні відомості: Комутація струму машини постійного струму є чи не найголовнішою проблемою для цього класу машин і полягає в зміні напрямку струму у секціях обмотки якоря при їхньому замиканні щіткою. Комутація триває дуже малий проміжок часу (мілісекунди, або навіть долі мілісекунди) і супроводжується візуальним іскроутворенням під щітками.

Причиною виникнення іскор є незкомутувана електромагнітна енергія у секціях при розмиканні щіткою комутуючого контуру. За процесом зміни енергії у комутуючих секціях відповідають додаткові полюси машини. Останні забезпечують у комутуючих секціях наявність *комутуючої ЕРС*, яка змушує струм секції змінюватися за досить короткий період комутації, що також еквівалентне до відбору енергії секцій додатковими полюсами за час комутації.

Розрахункова оцінка комутації полягає у визначенні умовної ЕРС самоіндукції секції при лінійній зміні її струму за період комутації у необхідному діапазоні (подвійний струм паралельної гілки якорю). Цю величину називають *реактивною ЕРС секції*.

Таким чином, при аналізі процесу комутації вважають, що у комутуючій секції діють дві зустрічні ЕРС – реактивна в результаті зміни струму та комутуюча, забезпечувана дією додаткових полюсів. Баланс цих ЕРС забезпечує добру комутацію без іскроутворення, порушення цього балансу в той чи інший бік призводить до уповільненої ($e_r > e_k$), або прискореної ($e_r < e_k$) комутації.

Візуально якість комутації оцінюється за допомогою бальної шкали, обумовленою ГОСТ 183-74. Небезпека комутаційних порушень полягає в пошкодженнях щітково-колекторного апарату, яке спричиняє іскріння щіток.

Ступінь іскріння в 1 бал : – повна відсутність іскор (темна комутація);

Ступінь іскріння в $1^{1/4}$ бал : – слабе точкове іскріння під обмеженою поверхнею щітки ;

Ступінь іскріння в $1^{1/2}$ бал : – іскріння під більшою частиною щітки, але не сильне;

Ступінь іскріння в 2 бали: – інтенсивне іскріння під усією поверхнею щітки із початком її руйнації. Випробування при іскріння у 2 бали обмежені за часом, це іскріння буває при робочому перевантаженні, допускається як короткочасне. Подальший розлад комутації із посиленням іскріння більш ніж 2 бали є небезпечним і не допускається.

Візуальна оцінка комутації, хоча вона і закріплена ГОСТ, але є досить суб'єктивною і не дає інформації про сам характер комутації, що спричинив іскріння. Тому на практиці використовують у якості основного метод зняття області безіскрової роботи (ОБР). Цей метод полягає у спостереженні за появою іскор під щіткою (її збігаючим краєм) при штучному порушенні балансу ЕРС за рахунок живлення додаткових полюсів струмом від додаткового джерела (підсилюючи або послаблюючи останні). При проведенні досліду фіксують параметри (струм підживлення чи ослаблення) при якому з'являється перше ікроутворення (ступінь комутації у $1^{1/4}$ балів). Випробування проводиться для умов певного режиму (частоти обертання та навантаження). За результатами цього дослідження можна не тільки зробити висновок про характер комутації, але і розрахувати умови її налагодження (коригування повітряного зазору під додатковими полюсами). Це ілюструє приклад знятої ОБР на рисунку та емпірична формула Касьянова корекції повітряного зазору полюсів.

$$\delta_{\text{вно}} = \frac{\delta_{\text{всста}}}{1 \pm \frac{\theta}{\theta - 1} \cdot \frac{\Delta i_n}{I}}$$

де Δi_n – струм підживлення (відживлення), що відповідає середній лінії ОБР при навантаженні I.

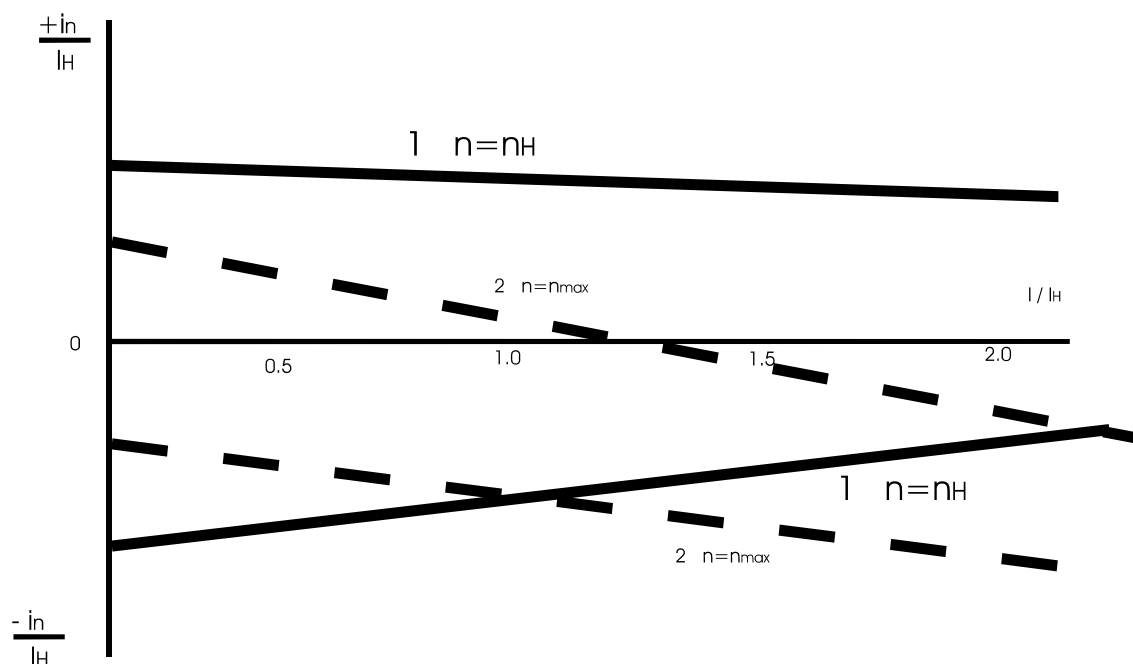


Рисунок 5 – Вигляд областей безіскрової роботи (ОБР)

Слід зазначити, що перед проведенням комутаційних дослідів, треба перевірити готовність для цих випробувань двигуна. Ця перевірка полягає у контролі встановлення щіток на геометричній нейтралі, при цьому магнітні вісі якірної обмотки і додаткових полюсів співпадають із поперечною магнітною віссю машини і можна бути певним, що в комутаційній зоні немає дії від поля головних полюсів, бо вона розташована симетрично відносно поперечної вісі. Дану перевірку зазвичай роблять індукційним методом, який полягає у подачі імпульсу струму збудження і контролю відхилення (наявності ЕРС) на комутуючій (замкненій накоротко щіткою) секції. Цей контроль проводиться за допомогою гальванометра із нулем посередині, гальванометр має бути магнітоелектричної системи. Відхилення стрілки приладу в той чи інший бік означає зміщення щіткової траверзи відносно геометричної нейтралі у зазначений бік і має бути скориговане.

Підготовка до проведення роботи:

1. Повторити теоретичний матеріал, стосовно комутації двигунів, користуючись літературою та конспектом лекцій.

2. Ознайомитися із експериментальними методами дослідження комутації.

3. Підготувати бланк звіту з проведення лабораторної роботи, використовуючи ці методичні вказівки.

Робоче завдання до проведення роботи:

Частина 1 Встановлення щіток на геометричну нейтраль.

Схема досліду приведена на рисунку 6.

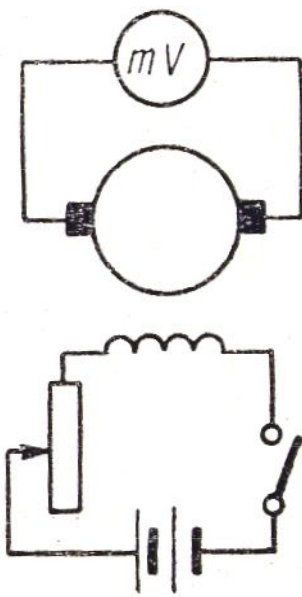


Рисунок 6 – Схема встановлення щіток на геометричну нейтраль

1.1 За допомогою стороннього джерела (аккумуляторна батарея) подати живлення на обмотку збудження двигуна. Двигун має бути нерухомим і на якірне коло його живлення не подається.

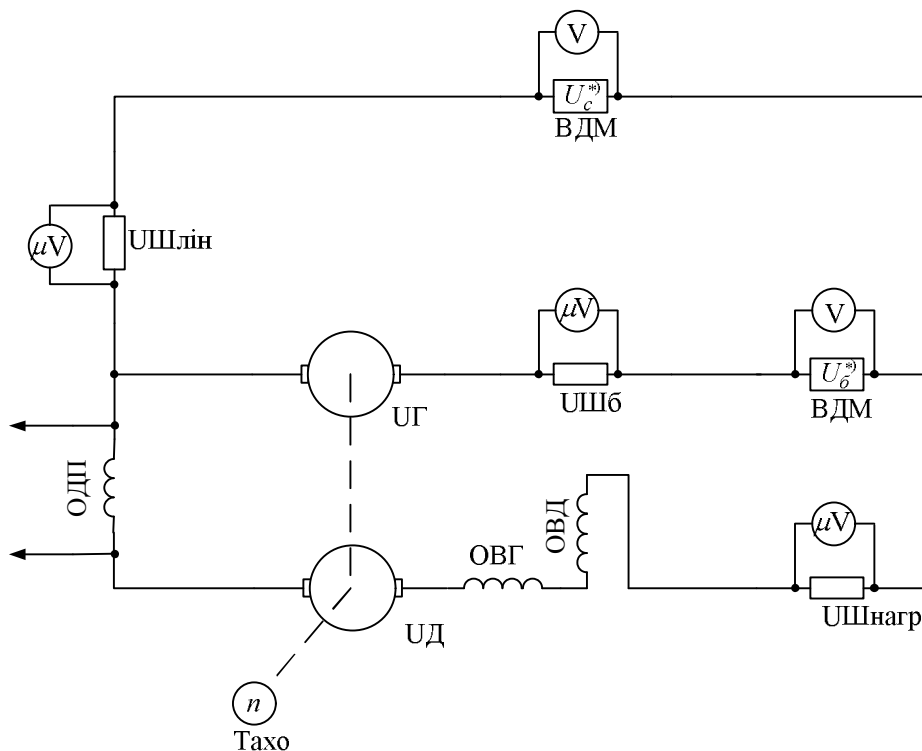
1.2 До двох сусідніх щіток, знявши захисну кришку з колектора, під'єднати мілівольтметр з нулем посередині.

1.3 Шляхом замикання та розмикання кола обмотки збудження (джерела аккумулятора) спостерігати за відхиленням стрілки приладу

1.4 Результати спостережень занотувати до звіту.

Частина 2 Зняття області безіскрової роботи двигуна.

Схема досліду приведена на рисунках 7 і 8.



УШ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 7 – Схема зняття ОБР

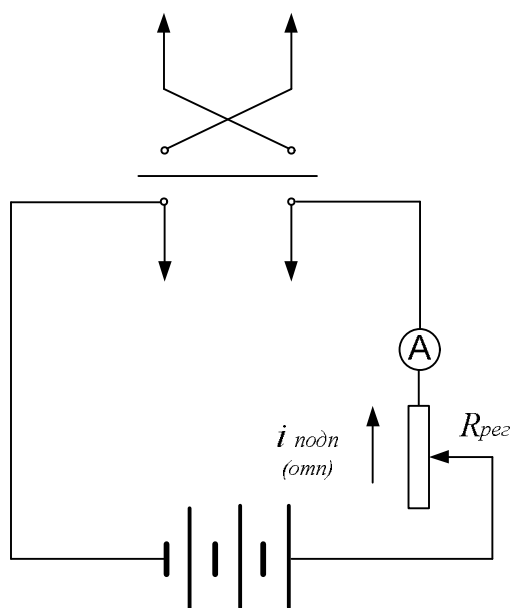


Рисунок 8 – Схема підживлення або ослаблення ДП

2.1 Разом із викладачем перевірити схему проведення випробувань (рис. 6) на взаємне навантаження двигунів та схеми подачі додаткового живлення на обмотку додаткових полюсів. Живлення на обмотку додаткових полюсів достатньо подавати тільки на одну пару, що дозволяє конструкція двигуна ТЕ-022, завдяки вирівнювальним властивостям хвильової обмотки якоря.

2.2 Задати робочий режим згідно зі схемою рисунок 7 (частоти обертання та струму навантаження).

2.3 При заданому робочому режимі провести досліди підживлення та ослаблення додаткових полюсів згідно зі схемою рисунка 8. При проведенні дослідів фіксувати появу іскор під збігаючим краєм щітки. Значення струму навантаження і струмів підпитки та відпитки ДП нанести на заготовку для ОБР, подібну до рисунку 5.

2.4 Змінюючи струм навантаження, але підтримуючі частоту обертання регулюванням джерел схеми рисунку 7, повторити дослід п. 2.3 принаймі ще двічі за нанесенням результатів на заготовку до звіту.

Обробка результатів

1. За першою частиною роботи описати методику перевірки встановлення щіток на геометричну нейтраль та зробити висновки щодо положення щіток на нейтралі.

2. За другою частиною роботи оформити на аркуші міліметрівки зняту область безіскрової роботи (ОБР).

3. Зробити висновок про характер комутації за даними ОБР.

4. Для найбільшого значення струму навантаження за допомогою формули Касьянова зробити корекцію повітряного зазору під додатковими полюсами. Для двигуна ТЕ-022 параметр $\theta = \frac{F_{\partial n}}{F_a} = 1.16$, повітряний зазор під ДП $\delta_{всета} = 4.5 \text{ мм}$.

Контрольні питання

1. Як поведуть себе ОБР при регулюванні швидкості?
2. Назвіть головні причини розбіжності ОБР при регулюванні швидкості.
3. Що таке комутаційна реакція якоря?
4. Як потрібно було б зміщувати щіткову траверзу для режиму двигуна для створення поля потрібного напрямку у зоні комутації при відсутності або недостатній дії ДП?
5. Які допустимі величини реактивної ЕРС?
6. Що таке небалансна ЕРС, та які її граничні значення?
7. Які головні причини розладу комутації у стаціонарних режимах роботи?
8. Які головні причини розладу комутації у перехідних режимах роботи?

Лабораторна робота 4

«Стендові випробовування тягового двигуна»

Тема 8. Випробування тягових електричних машин. Програма типових, періодичних та приймально-здавальних випробувань. Схеми з'єднань обмоток машини. Шум та вібрація в машинах.

Ціль роботи: дослідження властивостей та характеристик двигуна з послідовним збудженням у режимах тяги на схемі на взаємне навантаження. Ознайомлення із програмою випробувань двигунів.

Теоретичні відомості: Під взаємним навантаженням розуміють роботу двох електричних машин, з'єднаних електрично і механічно, таким чином, що одна навантажується у режимі двигуна, а друга – у режимі генератора.

Схеми взаємного навантаження є основними схемами для виробничих випробувань двигунів. Досить просту реалізацію мають схеми випробувань двигунів із незалежним збудженням, їхні якоря паралельно підключаються до джерела живлення (мережі), а регулюючи збудження цих машин в схемі здійснюється їхнє навантаження.

Вочевидь, що головною перевагою взаємного навантаження залишається економічність схеми при випробуваннях, бо із мережі споживається лише потужність на покриття втрат у обох машинах, тоді як імітація робочого режиму відбувається безвитратно.

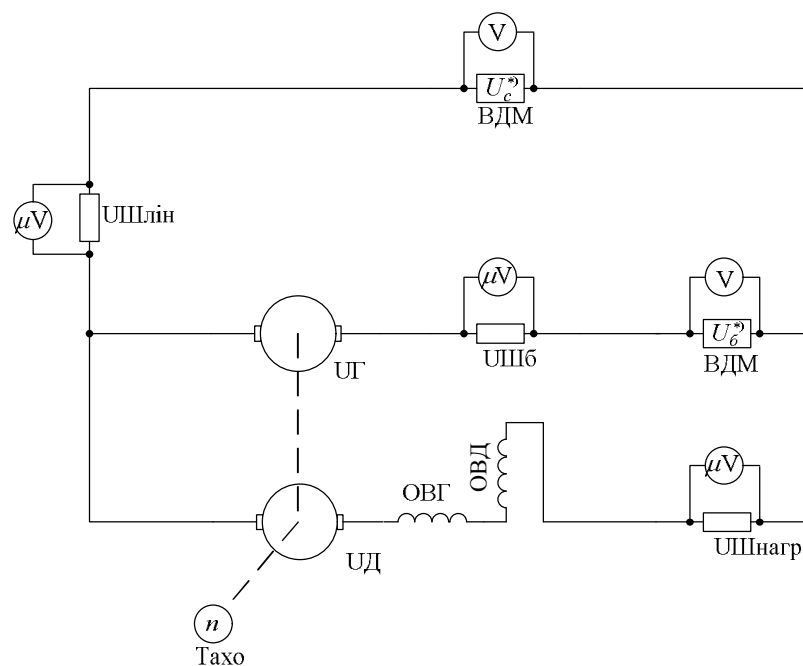
Випробування потужних машин часто проводяться у так званих другорядних режимах – режимі холостого ходу та режимі короткого замикання. Перший режим дає уявлення про стан магнітного кола випробованого двигуна, а другий відповідно про стан електричного кола та його навантаження. Однак таке рішення неможливе для двигунів послідовного збудження, бо вже режим холостого ходу у цих машин не може бути реалізований.

Тому для цього класу машин, до яких і належать більшість тягових двигунів запроваджують спеціальну схему випробувань, подану на рисунку 9.

Випробовувані машини повинні мати однакові зовнішні характеристики. Обмотки збудження обох машин з'єднують послідовно із якорем однієї з них, яка має навантажуватися у режимі двигуна.

Відносно джерела лінії (мережі) якоря обох машин включені паралельно, але між собою вони утворюють внутрішній контур, до якого включають додаткове джерело живлення на малу напругу та великий струм – бустер, або вольто-додатковий генератор, за допомогою якого у внутрішньому контурі створюють струм навантаження. Лінійне джерело регулює оберти машин, покриваючи їх механічні втрати, а бустер регулює навантаження, покриваючи решту втрат.

Перед запуском схеми із бустером перевіряють фазування машин – вони мають створювати протилежні моменти на спільному валу. Ця вимога забезпечується переключенням відповідної полярності кінців обмотки якоря чи збудження будь якої машини.



$UШ$ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 9 – Схема включення на взаємне навантаження машин із послідовним збудженням

Подана схема дозволяє проводити в повному об'ємі програму випробувань згідно до ГОСТ 183-74. *Програма типових випробувань* містить у собі такі пункти:

- виміри опору ізоляції між корпусом та між обмотками;
- виміри опорів обмоток у практично холодному стані на постійному струмі;
- випробування на підвищеній частоті обертання;
- повторне випробування ізоляції обмоток;
- випробування міжвиткової ізоляції на електричну міцність;
- визначення токів збудження в режимі холостого ходу;
- перевірка номінальних даних машини (моторної точки);
- перевірка комутації при номінальному навантаженні та при робочому перевантаженні;
- визначення характеристики намагнічування;
- визначення робочої (швидкісної) характеристики;
- визначення регульовочної характеристики;
- випробування на нагрівання;
- визначення областей безіскрової роботи та визначення якості комутації;
- визначення втрат та ККД;
- виміри вібрації;
- виміри биття колектору;
- виміри радіозавад.

Серед перелічених вимірів в першу чергу проводять виміри ізоляції за допомогою мегомметра.

Виміри опорів обмоток визначаються їхніми малими значеннями. На опри обмоток збудження та полюсів можуть впливати похибки за рахунок болтових та решти з'єднань, їхньої якості. А от опір обмотки якоря дуже важливий

для визначення якості всієї машини слід визначати дуже ретельно. Стан з'єднань на нього впливає незначною мірою.

Виміри опору обмотки якоря проводяться звичайно *методом вольтметра-амперметра*, для підвищення точності цих вимірів проводиться дослід тричі для різних значень струмів. Значення струму повинні бути значними, вважаючи на малість вимірювального опору. Часто виміри проводяться також методом подвійного мосту (мосту Томсона), використовуючи батареї вимірювальних опорів.

При вимірюванні опору за методом вольтметра-амперметра значення вимірюваного опору визначається за законом Ома

$$r_u = \frac{U}{I},$$

Вимірювання опору простих хвильових обмоток регламентується ГОСТ 10159-83 і вимагає проводити виміри опорів між колекторними пластинами, які відстоять на $\frac{K}{2p}$ колекторних пластин. Виміри відбуваються при піднятих щітках за допомогою щупів-голок. Значення розрахункового опору визначається для хвильових простих обмоток за формулою

$$r = r_u \times \frac{\left(\frac{K}{p}\right)^2}{\left(\frac{K}{p}\right)^2 - 1}.$$

Підготовка до проведення роботи:

1. Повторити теоретичний матеріал, стосовно двигунів послідовного збудження, користуючись літературою та конспектом лекцій.
2. Ознайомитись із схемою взаємного навантаження тягових двигунів.
3. Ознайомитися із розрахунковими даними стендових двигунів ТЕ-022, наведених у доданку.
4. Підготувати бланк звіту з проведення лабораторної роботи, використовуючи ці методичні вказівки.

Робоче завдання до проведення роботи:

1. Провести на випробовуваній машині виміри опору обмотки якоря, методом, описаним у теоретичній частині роботи.

2. Під керівництвом викладача (лаборанта) здійснити запуск схеми (двигунів на взаємне навантаження).

– встановити певний рівень напруги живлення від мережі (U_c);

– змінюючи напругу бустера (ВДМ) зняти не менше чотирьох точок, при цьому напругу мережі слід підтримувати за первинному рівні (підрегулювати);

– дані занести у бланк:

Напруга мережі: $U_c =$

Струм лінії, А	Струм бустера, А	Струм навантаження, А	Напруга бустера, В	Частота обертання, об/в	Напруга на затискувачах двигуна, В

Обробка результатів

1. За методом вольтметра-амперметра та формулою

$$r = r_u \times \frac{\left(\frac{K}{P}\right)^2}{\left(\frac{K}{P}\right)^2 - 1}, \text{ визначити значення опору обмотки якоря у холодному стані.}$$

2. Зважаючи на значення температури навколишнього середовища привести значення опору до температури 15°C , користуючись температурною залежністю для міді

$$r_t = r_{15}(1 + 0.004(t - 15))$$

де t – значення температури повітря.

Порівняти одержане значення опору із розрахунковим для двигуна ТЕ-022, яке складає 0.054 Ом .

3. Безпосередньо на підставі даних експерименту побудувати на аркуші міліметрівки штучну електромеханічну (швидкісну) характеристики двигуна ТЕ-022 для значення напруги мережі у проведеному досліді.

4. Ознайомтеся зі схемою приглушення радіозавод для трамвайних двигунів та опишіть її у звіті.

Контрольні питання

1. На яке значення вимірювальної напруги проводиться випробовування ізоляції відносно корпусу? Якою напругою?

2. Які допустимі значення опору ізоляції відносно корпусу для експлуатації тягових двигунів (міського електротранспорту, залізничних, тощо)?

3. Які властивості якірної хвильової обмотки?

4. Чому для двигунів з послідовним збудженням неможливо запровадити випробування у другорядних режимах (холостого ходу та короткого замикання)?

5. Що є головним джерелом радіозавод ? Як їх приглушують?

6. Яку температуру можна визначити методом вольтметра-амперметра?

7. Яким чином визначають момент інерції двигуна (махову масу)?

Лабораторна робота 5

«Теплові випробування тягових машин»

Тема 10. Тепловий стан тягових електродвигунів. Режими роботи тягових моторів за тепловим станом. Термотривкість ізоляції. Теплові розрахунки тягових моторів

Ціль роботи: Експериментальне визначення кривої нагріву двигуна, визначення постійної часу нагріву. Вивчення методів еквівалентування режимів згідно ГОСТ до тривалого режиму S1.

Теоретичні відомості: Згідно до теорії нагріву твердого тіла, теплову модель електричної машини можна зводити до вирішення цієї задачі. Рівняння нагріву має вигляд

$$\sum \Delta p = cm \frac{d\theta}{dt} + \alpha S_{\text{охл}} \theta ,$$

а його розв'язання

$$\tau(t) = \frac{\Delta p_{\Sigma}}{\alpha S_{\text{охл}}} (1 - e^{-\frac{t}{T_n}}), T_n = \frac{C_{\text{дв}}}{\alpha S_{\text{охл}}}, \tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta p_{\Sigma}}{\alpha S_{\text{охл}}};$$

де Δp_{Σ} – сумарні відведені теплові втрати, Вт;

$S_{\text{охл}}$ – площа поверхні охолодження, м²;

α – коефіцієнт тепловіддачі поверхні, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{град}}$;

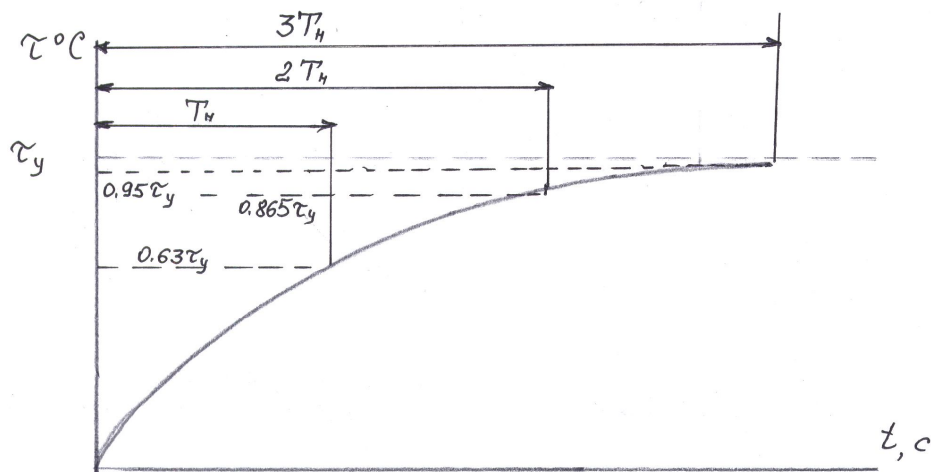
$C_{\text{дв}} = cm$ – теплоємність двигуна, $\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$;

T_n – постійна часу нагріву, сек. або год.

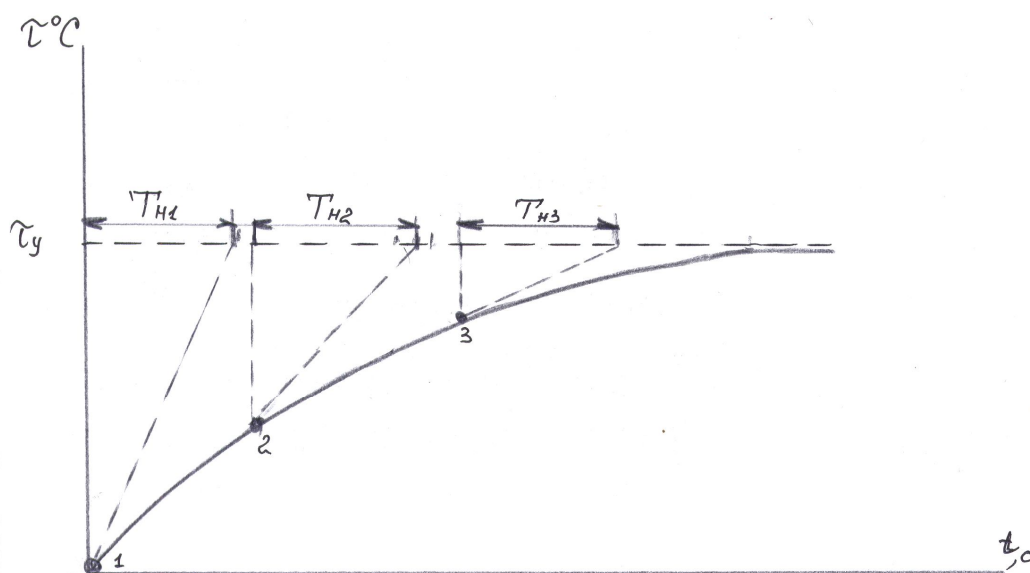
Подібним є і процес охолодження, але в результаті різних умов нагріву та охолодження (на нерухомій машині гірший коефіцієнт тепловіддачі), постійна часу охолодження більша за постійну часу нагріву.

Згідно до ГОСТ температуру вважають практично встановленою, якщо вона протязі години вона підвищується не більше ніж на 1° . Контроль температури варто проводити у найбільш нагрітих частинах обмотки – її лобових частинах. Оскільки зняття всієї кривої нагріву потребує достатньо багато часу, експеримент проводять на середині кривої нагріву при температурах на рівні $0.8\theta_{уст}$.

Експериментальне визначення постійного нагріву (охолодження) за трьома експериментальними точками демонструють нижче наведені графіки:

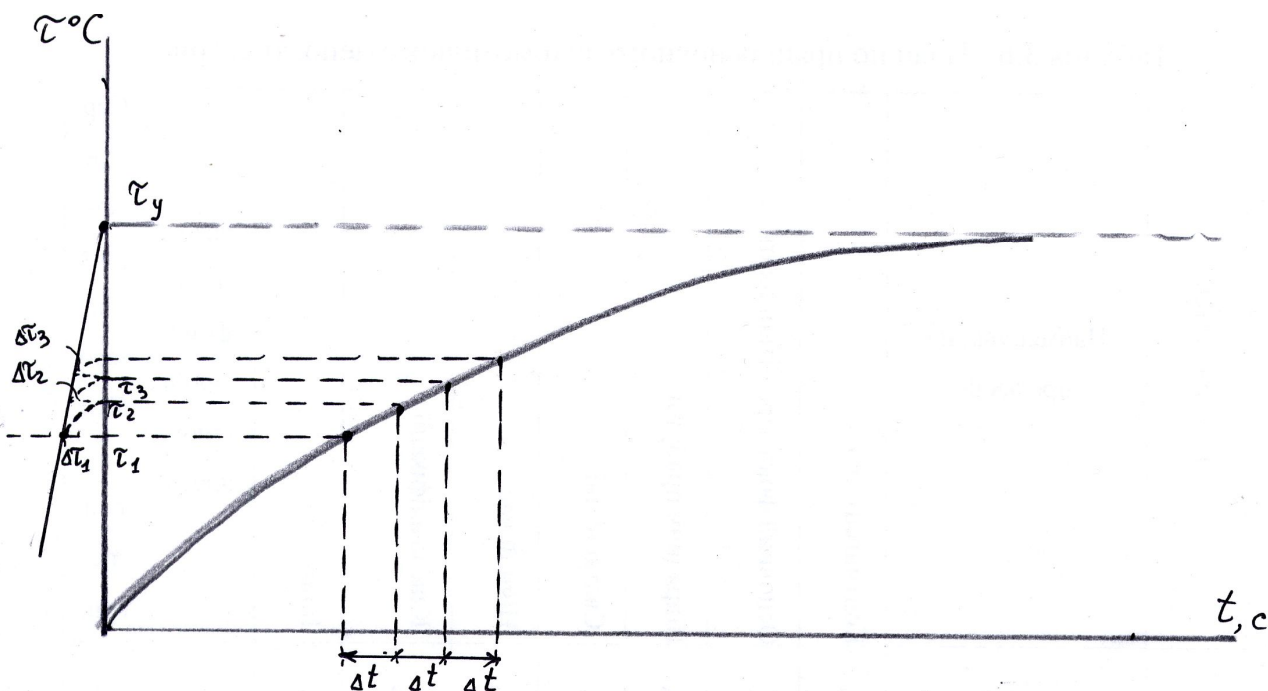


Визначення T_n за встановленою температурою

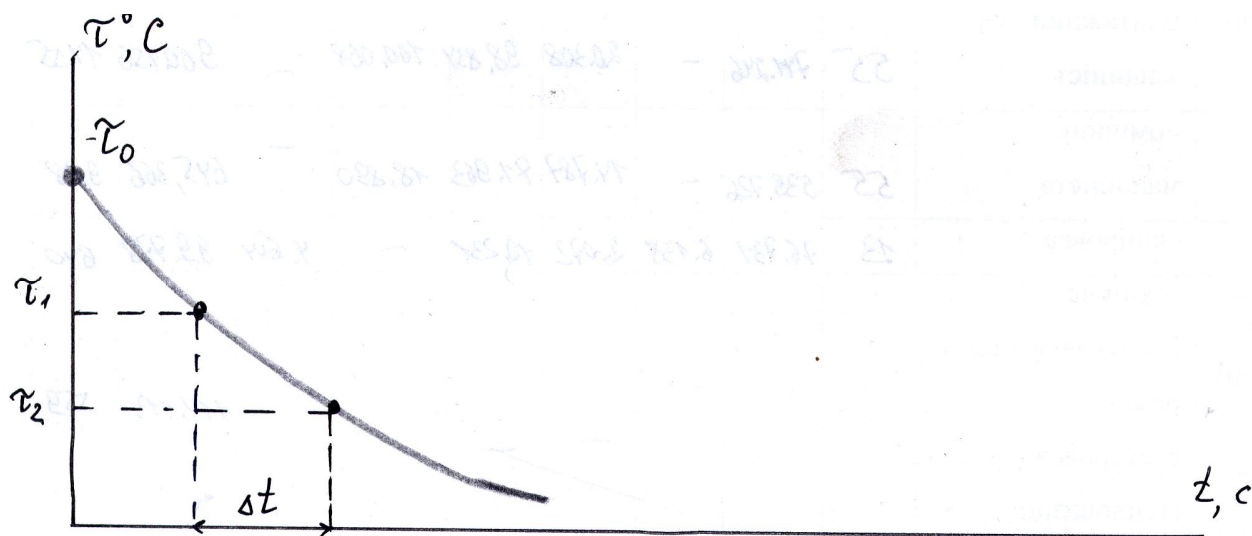


Визначення T_n методом піддатичної

Рисунок 10 – Експериментальне визначення постійного нагріву



Визначення T_H та τ_y за трьома точками кривої нагріву



Визначення сталою часу охолодження T_0 за двома точками

Рисунок 11 – Експериментальне визначення постійного охолодження

Визначення T_H за встановленою температурою:

$$t = T_H, \theta = 0.63\theta_y$$

$$t = 2T_H, \theta = 0.865\theta_y$$

$$t = 3T_H, \theta = 0.95\theta_y$$

Визначення T_H методом піддотичної (як і попередній метод, потрібно знання встановленого значення температури нагріву)

$$T_H = \frac{T_{H1} + T_{H2} + T_{H3}}{3}$$

Визначення T_H методом трьох точок. Цей метод не потребує знання встановленої температури нагріву, більше того, він дозволяє її обчислити.

$$T_H = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2}\right)}.$$

Визначення постійної часу охолодження за двома точками:

$$T_o = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}}.$$

ГОСТ 183-74 регламентує вісім основних режимів роботи електрообладнання S1 ÷ S8. Ці режими розрізняються за умовами нагріву двигуна, досягнення ним сталих перегрівів при роботі або паузі. У свою чергу, нагрів визначає термін служби ізоляції і довговічність усього двигуна. Основним режимом роботи машини, при якому всі її частини досягають сталих значень своїх перегрівів туст, є режим S1 – тривалий.

Як правило, номінальними даними двигуна (його потужністю, напругою, струмом навантаження, частотою обертання) є дані режиму S1. Коли за умовами експлуатації двигун працює в режимах, відмінних від S1, наприклад, у короткочасному (S2), повторно-короткочасному (S3) та ін., то його параметри приводять до умов тривалого режиму і тоді вони вважаються номінальними. Правила такого приведення називаються методами еквівалентних втрат або еквівалентного струму і розглядаються в курсі електроприводу в розділі його енергетики. Як правило, режим роботи тягового електродвигуна, особливо машин міського електротранспорту, може бути віднесений до режимів S5 (повторно-короткочасних із частими пусками та електричним гальмуванням).

Криві нагріву у режимах S1–S3 наведено нижче.

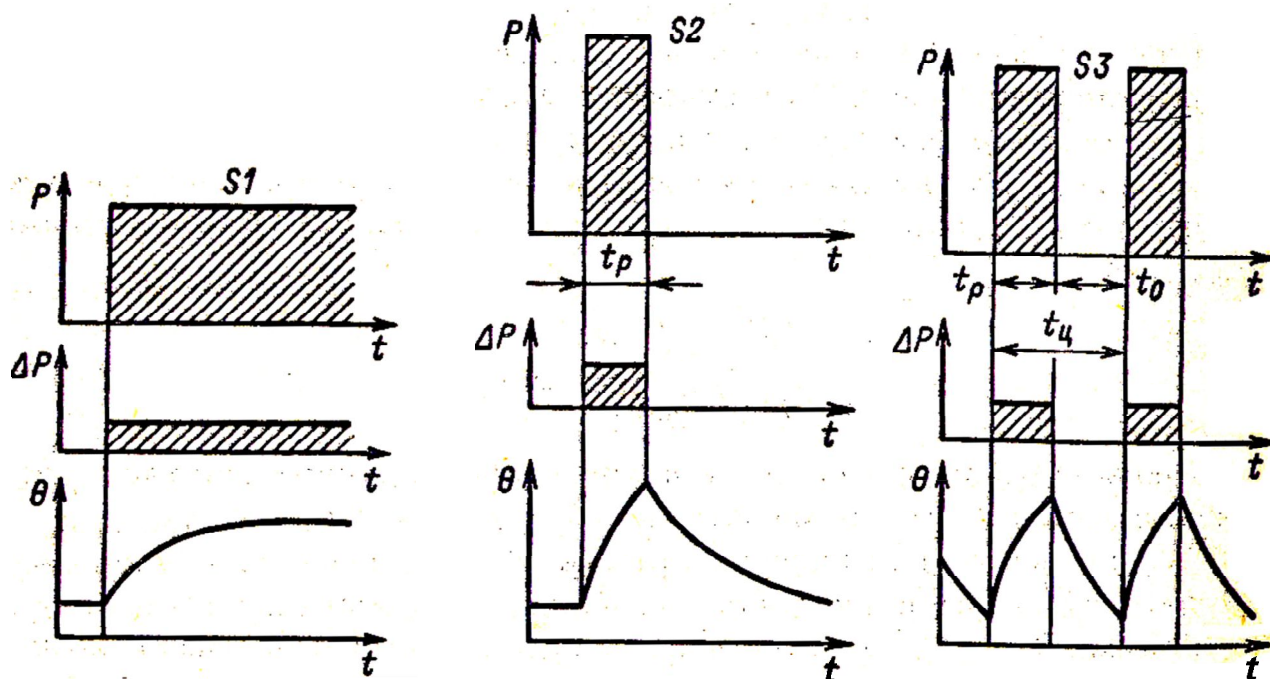
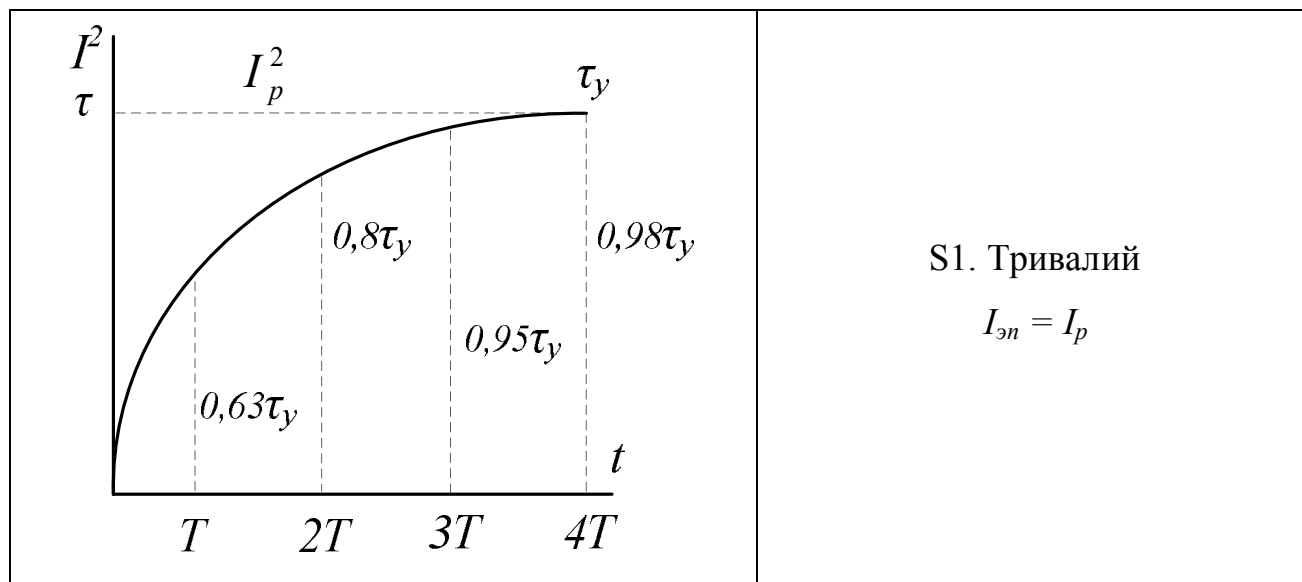
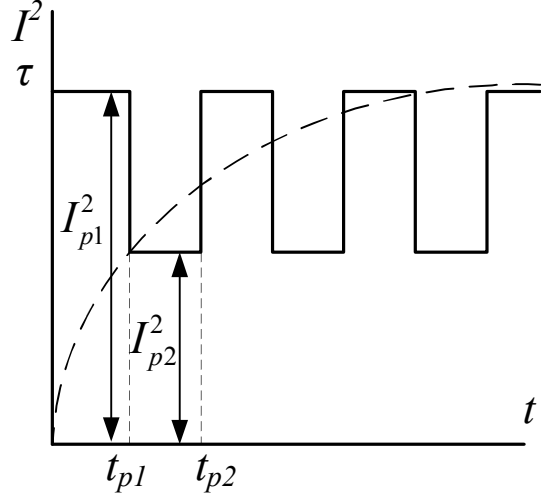
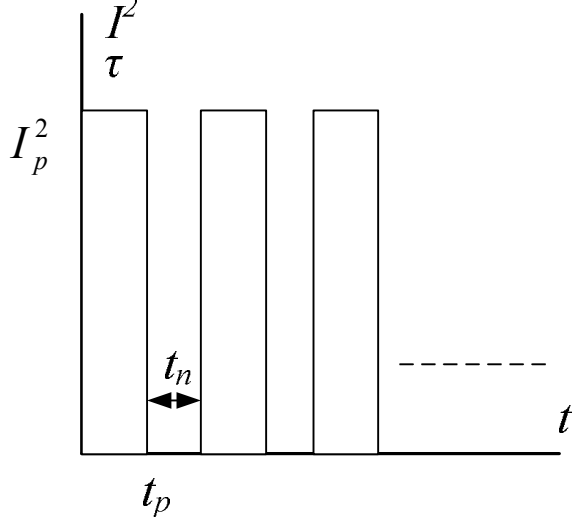
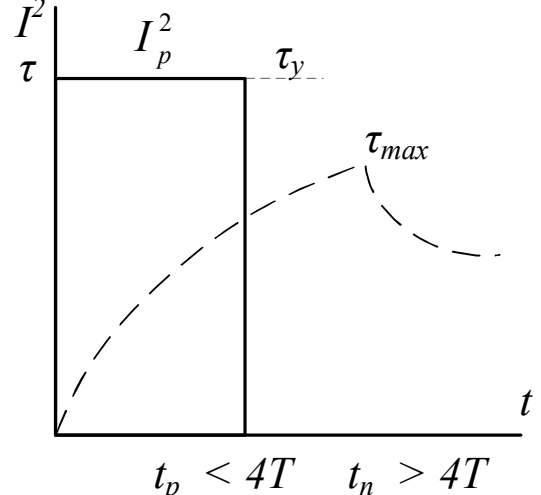


Рисунок 12 – Криві нагріву у режимах S1

Таблиця – Схеми еквівалентування режимів до тривалого S1



	<p>S6. Перемежающийся</p> $^2_{y\ddot{r}} = \sqrt{\frac{{}^2_{\delta 1}(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}) + {}^2_{\delta 2}(e^{-\frac{t_{p1}}{T}} + e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}})}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}}$
	<p>S3. Повторно – короткочасний</p> $\ddot{I}\hat{A} = \frac{t_p}{t_p + t_{\ddot{r}}}$ $^2_{y\ddot{r}} = {}^2_{\delta} \sqrt{\frac{1 - \overset{\circ}{a}^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - \overset{\circ}{a}^{-\frac{t_p}{T \cdot \ddot{I}}}}}$
	<p>S2. Короткочасний</p> $^2_{y\ddot{r}} = {}^2_{\delta} \sqrt{1 - \overset{\circ}{a}^{-\frac{t_p}{T}}}$

Виміри температури проводять двома методами:

- методом термометра;
- методом амперметра-вольтметра. Виміри проводять на нерухомій

машині.

Підготовка до проведення роботи:

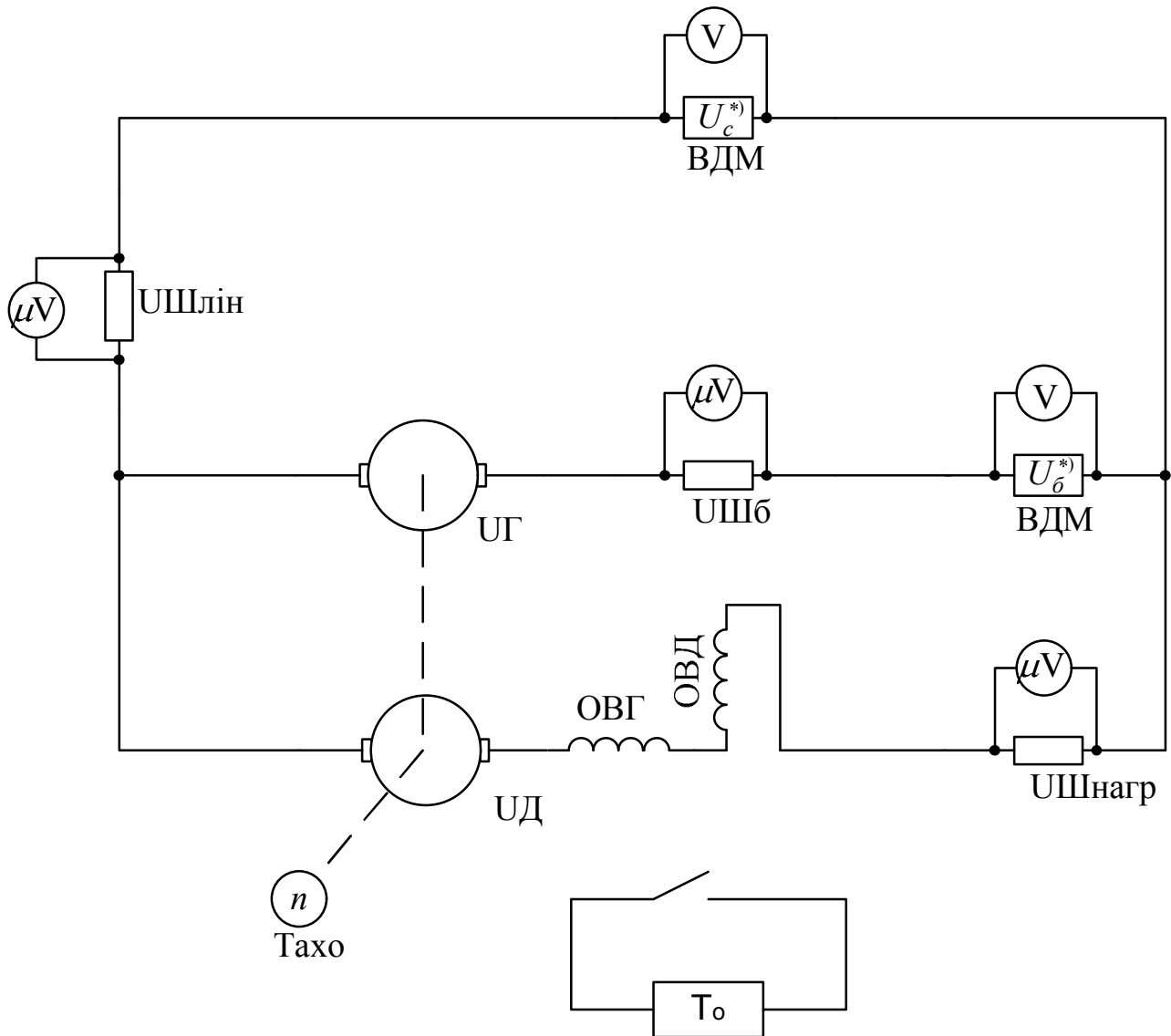
1. Повторити теоретичний матеріал, стосовно двигунів послідовного збудження, користуючись літературою та конспектом лекцій.
2. Ознайомитись із схемою взаємного навантаження тягових двигунів.
3. Ознайомитися із методами визначення постійних часу охолодження та нагріву та методами визначення кінцевої температури нагріву.
4. Підготувати бланк звіту з проведення лабораторної роботи, використовуючи ці методичні вказівки.

Робоче завдання до проведення роботи:

Під керівництвом викладача (лаборанта) здійснити запуск схеми (двигунів на взаємне навантаження):

- встановити певний рівень навантаження двигунів та частоти обертання;
- проводити виміри температури чотири рази з інтервалом у 10–15 хвилин за методом амперметра-вольтметра та методом термометра при зупинці машини. При подальшому випробуванні намагатися зберігати частоту обертання та значення навантаження на обраному рівні, щоб не порушувати умов досліду;
- дані занести у бланк.
- провести зняття двох точок кривої охолодження двигуна.

Вигляд схеми дослідження



UШ – вимірювальні шунти (вимірювання струмів);

*) – позначення джерела регульованої напруги постійного струму;

Рисунок 13 – Схема дослідження

Обробка результатів:

1. За даними експерименту збудувати криву нагріву двигуна.
2. Методом трьох точок визначити постійну часу нагріву та встановлену температуру нагріву.
3. Перевірити дані, одержані в п. 2 методами піддотичної та методом встановленої температури.

4. Визначити постійну часу охолодження та порівняти її значення із постійною часу нагріву.
5. Побудувати вигляд кривої охолодження двигуна.
6. За завданням викладача визначити дані тривалого режиму S1 за поданою діаграмою інших режимів за ГОСТ 183-74 (S2, S3, S6).

Контрольні питання

1. Чим зумовлений коефіцієнт тепловіддачі з поверхні?
2. Чому процес нагріву носить аперіодичний характер?
3. Що вважається за період досягнення встановленого нагріву в тривалому режимі?
4. Поясніть, що означає «годинний режим» роботи з позиції нагріву машини? Яке співвідношення потужностей годинного і тривалого режимів?
5. Які значення ПВ для режиму S3 регламентовано ГОСТ? Яка залежність потужності режиму S3 від значень ПВ?
6. Що слід для тягового двигуна вважати за головні поверхні охолодження?
7. Що таке тепловий фактор машини, які його граничні значення?
8. Перелічить граничні значення питомих струмів у обмотках машини.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Находкин М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, М. А. Козорезов, Д. М. Лупкин. – М. : Транспорт, 1967. – 536 с.
2. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины / Д. Д. Захарченко, И. А. Романов. – М. : Транспорт, 1991. – 343 с.
3. Бертинов А. И. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: в 2-х кн. / А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.; Под ред. Б.Л. Алиевского. – М. : Энергоатомиздат, 1993.
4. Костенко М. П. Электрические машины (ч1, ч.2) / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – М – Л.: Энергия, 1965, 544 с. и 704 с.
5. И. Н. Рабинович Проектирование машин постоянного тока / И. Н. Рабинович, И. Г. Шубов. – Л. : Энергия, 1967. – 504 с.
6. Калиниченко Ю. С. Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму : навч. посібник / Ю. С. Калиниченко, А. І. Кузнецов. – Харків : ХНАМГ, 2004. – 218 с.
7. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М. : Высшая школа, 1984. – 431 с.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт

з курсу

СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович,
КОЛОТІЛО Віталій Іванович,
ЛУКАШОВА Наталія Павлівна

Відповідальний за випуск : *О. М. Петренко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2013, поз. 136М

Підп. до друку 27.03.2014. Формат 60×84/16

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,6

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.