

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

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт
із навчальних дисциплін

«ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

та

«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2020

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальних дисциплін «Основи електричної тяги» та «Теорія електричної тяги» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : С. О. Закурдай, І. О. Костенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 90 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. С. О. Закурдай,
асист. І. О. Костенко

Рецензент

О. В. Донець, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 9
від 26 листопада 2019 р.*

ЗМІСТ

1	ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	4
1.1	Підготовка і порядок проведення занять у лабораторії електричної тяги.....	4
1.2	Порядок оформлення звіту з лабораторної роботи.....	5
1.3	Правила й заходи безпеки при виконанні робіт.....	8
1.4	Обладнання робочого місця.....	11
1.5	Порядок виконання робіт на стендах.....	15
2	ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....	17
	Лабораторна робота № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ НАПРУГИ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ НА РОБОТУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	17
	Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ДВИГУНАМИ	28
	Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОГО І СХІДЧАСТОГО РЕОСТАТНОГО ПУСКУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	39
	Лабораторна робота № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ НА РОБОТУ ТЯГОВОГО ДВИГУНА	53
	Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОСТАТНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ	63
	Лабораторна робота № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	75

1 ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1.1 Підготовка і порядок проведення занять у лабораторії електричної тяги

Метою лабораторних робіт є поглиблення та закріплення теоретичних знань, які отримані студентами на лекціях, а також навчання їх методам експериментальних і наукових досліджень, прищеплення навичок наукового аналізу й узагальнення отриманих результатів, навичок роботи з лабораторним обладнанням, апаратурою, вимірювальними приладами й обчислювальною технікою.

Для роботи в лабораторії електричної тяги викладач за участю старости навчальної групи поділяє групу на бригади і призначає старших бригад. У процесі занять всі операції з виконання експерименту проводяться за командами старшого бригади, який відповідає за правильне виконання експерименту і дотримання правил та заходів безпеки членами бригади.

Лабораторні заняття є одним з найважливіших етапів вивчення основ електричної тяги. Вони будуть ефективними лише в тому випадку, якщо кожен студент буде в достатній мірі підготовлений до чергового заняття. При підготовці до заняття студент повинен:

- вивчити за конспектом і підручником теоретичний матеріал, що відноситься до даної роботи;
- вивчити за методичними вказівками до лабораторних робіт електричну схему випробувань, усвідомити призначення всіх її елементів;
- ознайомитися з пристроєм, елементами керування, порядком роботи і заходами безпеки при роботі на випробувальному стенді;
- заготовити на бланку звіт таблиці для запису експериментальних і розрахункових даних, записати формули, за якими будуть проводитися обчислення, зарисувати електричну схему випробувань.

Перед початком робіт викладач шляхом перевірки необхідних матеріалів і опитування виявляє готовність студентів до роботи. Студенти, які погано підготовлені або не подали звіт про попередню роботу, до виконання чергової роботи не допускаються.

При виконанні експериментів відмітки показань вимірювальних приладів проводяться за командою старшого бригади «Відлік». Показання приладів записують в таблиці робочих зошитів у тих одиницях, які нанесені на шкалах приладів, тобто у вольтах, амперах, об/хв і т. п.

У несталих режимах роботи запис показань слід робити в поділках шкали приладу.

По закінченні експерименту числа поділок переводяться у вимірювані одиниці шляхом множення числа поділок на постійну вимірів (ціну розподілу шкали) C . Вона дорівнює: для амперметра $C_I = \frac{I_{ном}}{N}$, для вольтметра $C_U = \frac{U_{ном}}{N}$, де $I_{ном}$ і $U_{ном}$ – номінальні величини (межі вимірів) приладу, N – повне число поділок шкали.

По закінченні досліду студенти перевіряють отримані результати шляхом побудови на міліметровому папері кривої (характеристики). Якщо частина точок не розташовується на кривій, а різко випадає, то це вказує на відсутність у студента навичок у проведенні експерименту, або на наявність перешкод під час досліду. У цьому разі дослід повинен бути повторений. Результати досліду показують викладачеві.

Після перевірки викладачем даних, отриманих студентом при випробуваннях, всі елементи керування випробувального стенда мають бути приведені у вихідний стан, після чого студенти приступають до оформлення звіту про виконану роботу.

Перед закінченням занять викладач підводить підсумки занять, коротко аналізує дії студентів при виконанні робіт, ставить завдання на наступне заняття.

1.2 Порядок оформлення звіту з лабораторної роботи

Звіт повинен містити:

- назву лабораторної роботи;
- дату виконання,
- номер навчальної групи,
- прізвище і ініціали студента,
- мету лабораторної роботи,
- завдання лабораторної роботи,
- електричну принципову схему випробувань,
- таблиці з результатами вимірів і обчислень,
- діаграми і графіки,
- формули, за якими робилися обчислення,
- висновки з роботи (оцінку виявлених властивостей тягових електричних

машин відповідно до умов їхньої експлуатації на електрорухомому складі міського транспорту).

Особливу увагу слід звернути на виконання графічних робіт. Усі схеми повинні бути виконані відповідно до стандартних умовних графічних позначень з показом усіх використаних приладів і апаратів. Креслення не повинне містити зайвих позначень і пояснень – гарне креслення зрозуміле і без них. В одних (загальних) осях координат можна будувати кілька кривих (характеристик), якщо їхнє сусідство збільшує наочність і полегшує зіставлення (наприклад, швидкісні характеристики, характеристики сили тяги та ін.). При цьому для кожної кривої (функціональної залежності) повинні бути побудовані шкали масштабів паралельно осі ординат (рис. 1.1).

При побудові графіків треба вибирати зручні для побудови й використання масштаби, тобто такі, щоб в одному сантиметрі шкали укладалося число вимірюваних одиниць, кратне *1, 2, 5, 10, 25* і т. д.

Бажано, щоб графіки мали розміри *10×10* чи *10×15 см*.

На кресленні, якщо воно виконане не на міліметровому папері, повинна бути нанесена масштабна сітка, що полегшує побудову кривих і їхнє практичне

застосування. Позначення масштабів повинні бути нанесені на осях координат і на шкалах масштабів через кожні 1–2 см. Нульове значення масштабу, як правило, вибирають на початку координат. Вибір ненульових початкових значень вимірюваних величин допускається в тих випадках, коли є необхідність виділити ту частину графіка, в межах якої величина, що нас цікавить, змінюється повільно (наприклад, зміна ККД машини в межах навантаження від $0,5P_{ном}$ до $1,25P_{ном}$).

Для побудови кривих (характеристик) на графік спочатку наносяться експериментальні точки, а потім злегка (слабкими рисками) проводять криву. Переконавшись в її плавності, характеристику викреслюють (наводять) під лекало. Якщо на графіку кілька характеристик, то кожна з них повинна бути позначена відповідним написом.

Рекомендується на графіках зверху чітко написати найменування характеристик і умови, при яких вони були зняті. Усі рисунки з графіками повинні мати нумерацію і найменування.

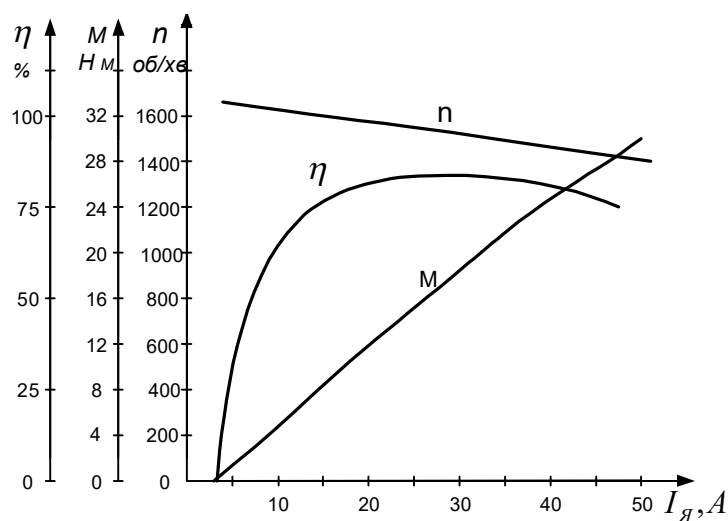


Рисунок 1.1 – Зразковий вид графіка з характеристиками електричної машини

Таблиці повинні бути пронумеровані арабськими цифрами і мати тематичний заголовок.

При виконанні розрахунків особливу увагу треба звернути на узгодження одиниць виміру усіх величин, що входять у розрахункову формулу, з

обов'язковою вказівкою одиниць виміру розрахункової величини. Розрахунки виконують у такій послідовності:

– записати розрахункову формулу з літерними позначеннями вхідних величин;

– підставити чисельні значення величин у погоджених одиницях виміру і записати результат, обов'язково позначити одиницю виміру.

У всіх розрахунках повинні бути використані чисельні значення величин в одиницях міжнародної системи одиниць СІ.

Зняття і побудову характеристики треба ретельно проаналізувати. Студент зобов'язаний уміти пояснити зняті характеристики, показавши, які фізичні процеси вони відбивають або, навпаки, якими фізичними процесами пояснюється вид характеристики.

У коротких висновках з роботи повинна бути дана оцінка відповідності змін теоретичним положенням і розрахунковим даним.

1.3 Правила й заходи безпеки при виконанні робіт

При виконанні робіт у лабораторії електричної тяги кожен студент зобов'язаний дотримуватись правил і заходів безпеки при роботі на діючих електроустановках. Невиконання цих правил пов'язано з можливістю ураження електричним струмом, а також одержання каліцтва від механічного впливу обертових частин машин і нагрітих елементів установок.

Протікання через організм людини електричного струму величиною $0,05\text{ A}$ може призвести до важкої електротравми, а струм величиною $0,09 \dots 0,10\text{ A}$ може викликати параліч серця і смерть. Опір тіла людини залежить від багатьох факторів і при несприятливих умовах може дорівнювати всього $800 \dots 600\text{ Ом}$. Отже серйозне ураження електричним струмом може відбутися при напрузі $40 \dots 30\text{ В}$. У лабораторії живлення випробувальних стендів здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В .

Частини електроустановок, які швидко обертаються, в тому числі гладкі вали, можуть затягти працюючих за волосся чи частини одягу і нанести каліцтво.

Щоб уникнути можливих нещасливих випадків, а також псування обладнання і вимірювальної техніки при роботі в лабораторії електричної тяги, кожен студент зобов'язаний:

1. Перед початком циклу лабораторних занять вивчити перераховані нижче правила й заходи безпеки і розписатися про їхнє засвоєння в журналі проведення інструктажу.

2. Перевірити заземлення пульта керування і двомашинного агрегату «двигун-генератор» стенда.

3. Збирання і розбирання схеми випробувального стенда робити тільки при виключеному живленні (при відключеному автоматичному вимикачі *SF1* «Мережа» на пульті керування).

4. Подачу живлення на двигун робити тільки при виведеному в «нульове» положення регуляторі напруги «АТ».

5. Перед включенням схеми стенда під напругу, а також після закінчення експерименту всі елементи керування встановити у вихідний – «пусковий» стан: вимикачі встановити у відключене чи нульове положення, реостати – в положення R_{\max} .

6. Перше включення стенда під напругу і перевірка роботи двомашинного агрегату здійснюються викладачем або старшим бригади під спостереженням викладача. Наступні включення стенда робити відповідно до вказівок викладача.

7. Перед кожним пуском двомашинного агрегату студент зобов'язаний переконатися, чи немає біля машин неприпустимо близько людей або предметів, що можуть бути захоплені обертовими частинами машин, і після цього попередити про пуск агрегату всіх членів бригади.

8. Включати стенд тільки на час проведення досліду (експерименту), протягом якого від усіх членів бригади потрібна пильна увага. Після включення стенда кожному члену бригади треба не забувати, що всі його елементи

знаходяться під напругою, тому дотик до неізолюваних струмопровідних частин стенда й обертових частин машин небезпечний для життя.

9. При раптовому зникненні напруги, появи запаху чи гару, виникненні несправностей в елементах стенда слід відключити живлення і доповісти про це викладачу. Не робити спроб самостійно усунути несправності.

10. У процесі досліду стежити, щоб струми в ланцюгах схеми і частота обертання електричних машин не перевищували допустимих для них значень.

11. Після закінчення досліду всі елементи керування стендом у визначеній послідовності встановити у вихідне положення і тільки після цього відключити живлення стенда.

12. У разі ураження електричним струмом необхідно негайно відключити живлення і відразу довести до відома про те, що трапилося, викладача.

13. При оголошенні перерви студенти зобов'язані припинити всі роботи і звільнити приміщення лабораторії. По закінченні перерви дозвіл на поновлення робіт дає викладач.

Категорично забороняється:

- робити включення чи відключення на головному розподільному щиті лабораторії, знімати й перевішувати вивішені в лабораторії застережливі плакати і написи;

- починати самостійно роботу без дозволу й перевірки викладачем працездатності стенда;

- самостійно встановлювати чи замінити плавкі запобіжники на стенді;

- ставати ногами, обпиратися чи сідати на електричні машини, апарати та інше електроустаткування;

- залишати без спостереження стенди, що знаходяться під напругою;

- торкатися обертових частин електричних машин, у тому числі поверхні гладких валів;

- знаходитися в лабораторії особам, які не беруть участі в заняттях.

1.4 Обладнання робочого місця

Лабораторний універсальний випробувальний стенд забезпечує проведення таких лабораторних робіт з основ електричної тяги:

1. Дослідження впливу ослаблення магнітного потоку на роботу тягового двигуна.
2. Дослідження плавного і східчастого реостатного пуску транспортного засобу.
3. Дослідження режимів руху транспортного засобу.
4. Дослідження реостатного гальмування двигуна послідовного збудження.
5. Дослідження впливу зміни напруги в контактній мережі на роботу тягових двигунів.

Стенд забезпечує наступні режими роботи системи «двигун-генератор», що входить до його складу :

1. Регулювання напруги живлення двигуна.
2. Плавне і східчасте регулювання навантаження генератора.
3. Регулювання струму збудження двигуна.
4. Плавний і східчастий пуск двигуна.
5. Переключення режиму: «пуск-вибіг-гальмування».
6. Реостатне гальмування двигуна.

Стенд дозволяє робити збірку однієї із схем перерахованих вище лабораторних робіт.

Елементи керування розташовані на вертикальній і горизонтальній панелі пульта керування (рис. 1.2).

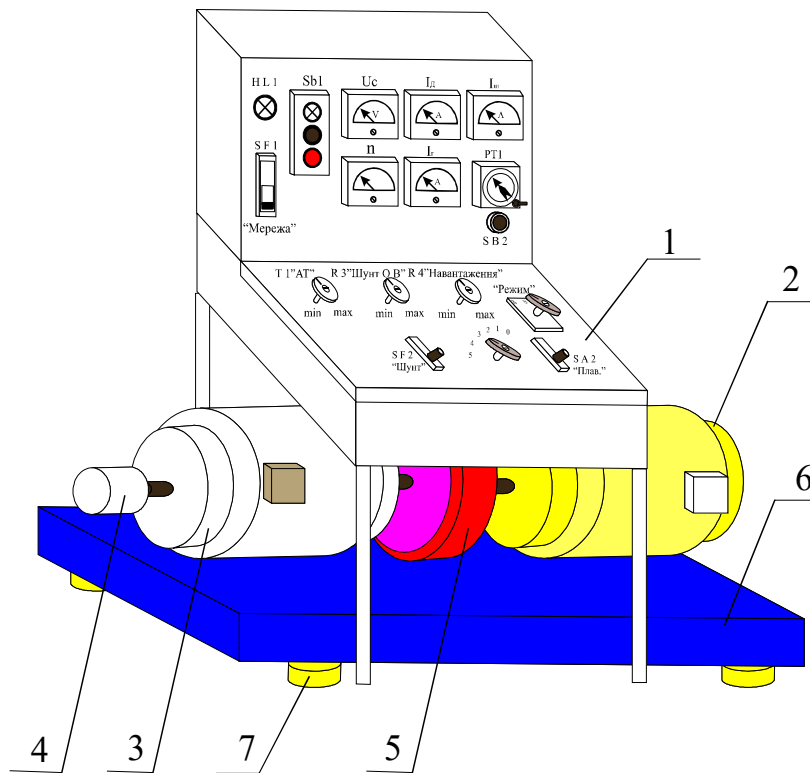


Рисунок 1.2 – Універсальний випробувальний стенд: 1 – пульт керування, 2 – двигун постійного струму, 3 – генератор постійного струму, 4 – тахогенератор, 5 – інерційна маса, 6 – рама, 7 – віброопори

Живлення стенда здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В.

З пульта керування виконують такі операції:

1. Автоматичним вимикачем *SF1* «Мережа» – подача змінної напруги 220 В на пульт керування.
2. Кнопковим постом *SB1* (*SB1.1* – «Пуск»; *SB1.2* – «Зупинка») – подача і зняття напруги на одну із зібраних схем.
3. Регулятором *T1* «АТ» – регулювання напруги, що надходить на двигун.
4. Перемикачем *SA1* «Режим» – переключення режимів роботи двигуна: хід, вибіг, гальмування.
5. Реостатом *R3* «Шунт» – шунтування обмотки збудження двигуна.
6. Автоматичним вимикачем *SF2* «Шунт» – підключення реостата *R3* «Шунт».
7. Реостатом *R4* «Навантаження» – плавне регулювання навантаження генератора і струму двигуна при його пуску.

8. Перемикачем *SA2* – вибір режиму пуску двигуна «Східчasto».

9. Перемикачем *SA3* «Зупинка» – східчaste переключення величини опору реостата *R4* «*R*». Штепсельне рознімання, встановлене праворуч на бічній поверхні горизонтальної панелі пульта керування, забезпечує збирання схем однієї з перерахованих вище лабораторних робіт шляхом установки в штепсельне гніздо фальш-вилки відповідної лабораторної роботи.

10. Контроль величини напруги на затискачах двигуна – вольтметром *PV1* «*U_C*».

11. Контроль величини струму двигуна, генератора і шунтового реостата *R3* «Шунт» (струму збудження двигуна) здійснюється відповідно амперметрами *PA3* «*IM1*» (струм двигуна), *PA2* «*I_{G1}*» (струм генератора) і *PA3* «*I_ш*» (струм шунта).

12. Контроль частоти обертання агрегату – вольтметром *PV2* «*n*»

13. Контроль часу гальмування двигуна – секундоміром *PT1* «*t*».

14. Кнопкою *SB2* «*t*» – пуск секундоміра *PT1*.

Сигналізація включеного стану контактора *KM1*, що подає живлення на двигун, здійснюється сигнальною лампочкою *HL2*.

Перед роботою на стенді необхідно ознайомитися з його будовою і порядком роботи, встановити вимикач *SF1* «Мережа» у відключене положення, перемикач *SA1* «режим» - у положення «Хід», реостат *R4* «*R*»- у положення R_{\max} , перемикач *SA3* «Зупинка» - у «нульове» положення, ручку регулятора *T1* «*AT*»- на «нульову» оцінку, реостат *R3* «Шунт» - у положення R_{\max} .

Стенд для проведення лабораторної роботи «Дослідження розподілу навантаження між двигунами» забезпечує такі режими роботи:

1. Почергову роботу двигунів.
2. Роботу двигунів при паралельному з'єднанні.
3. Роботу двигунів при послідовному з'єднанні.
4. Зняття електромеханічних характеристик двигунів при роздільній роботі.

5. Зняття характеристик при паралельному і послідовному з'єднанні двигунів.

До складу стенда входять: 1 – пульт керування, 2 – двигун постійного струму, 3 – генератор постійного струму, 4 – тахогенератор, 5 – інерційна маса, 6 – рама, 7 – віброопори, 8 – гальма з ручним приводом.

Живлення стенда здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В.

Елементи керування розташовані на вертикальній і горизонтальній панелі пульта керування.

З пульта керування здійснюються такі операції:

1. Автоматичним вимикачем *QF1 «Мережа»* – подача змінної напруги 220 В на пульт керування.

2. Кнопковим постом *SB1* – подача і зняття напруги на обмотки збудження і регулятор напруги *T1 «Рег»*.

3. Регулятором *T1 «Рег»* – регулювання напруги, що надходить на двигуни.

4. Кнопкою *SB3.1 «M1»* – включення двигуна *M1*.

5. Кнопкою *SB3.2 «M2»* – включення двигуна *M2*.

6. Кнопкою *SB3.3 «M1»* і *«M2»* – включення двигунів *M1* і *M2*.

7. Перемикачем *SA1* у положенні 3 – збирання схеми для одиночної роботи двигунів *M1* і *M2*.

8. Перемикачем *SA1* у положенні 2 – збирання схеми для паралельної роботи двигунів *M1* і *M2*.

9. Перемикачем *SA1* у положенні 1 – збирання схеми для послідовної роботи двигунів *M1* і *M2*.

10. Кнопкою *SB2 «Зупинка»* – розбирання схем, зібраних за п. 4-9.

11. Контроль параметрів двигунів:

- амперметром *PA1 «I_C»* (загальний струм, споживаний від джерела живлення);

- вольтметром *PA2 «U_{M1}»* (напруга, що надходить на двигун *M1*);

- вольтметром *PA3 «U_{M2}»* (напруга, що надходить на двигун *M2*);

- амперметром $PA2$ « I_{M1} » (струм двигуна $M1$);
- амперметром $PA3$ « I_{M2} » (струм двигуна $M2$);
- вольтметром $PA4$ « n » (обороти двигунів $M1$ і $M2$).

12. Сигналізація режимів роботи включеного стану елементів комутації здійснюється сигнальними лампочками $HL1-HL4$.

1.5 Порядок виконання робіт на стендах

1. Перед роботою на стенді ознайомитися з його будовою і порядком роботи.

2. Установити ручку регулятора $T1$ «Рег» на «нульове» позначення.

3. За допомогою перемикача $SA1$ вибрати один з режимів роботи стенда (одиначна, паралельна, послідовна робота двигунів $M1$, $M2$).

4. Включити автоматичний вимикач $QF1$ «Мережа» і подати змінну напругу 220 В на пульт керування.

5. Натисканням однієї з кнопок кнопочкового поста $SB3$ зібрати схему включення двигунів (двигуна) відповідно до обраного режиму роботи стенда (положенням перемикача $SA1$).

6. Подати живлення на регулятор $T1$ «Рег» (натиснути кнопку $SB1.1$).

7. Обертаючи ручку регулятора $T1$ «Рег», встановити необхідне значення напруги, подаваної на двигуни. При цьому загальний струм навантаження двигунів, контрольований амперметром $PA1$ « I_C », не повинен перевищувати $7-8\text{ А}$.

8. Зробити необхідні виміри параметрів двигунів.

9. Знизити регулятором $T1$ «Рег» напругу живлення до «0», після чого «зняти» живлення з регулятора кнопкою $SB2$.

10. По закінченні роботи відключити автоматичний вимикач $QF1$ «Мережа».

Сигналізація

1. При включенні автоматичного вимикача *QF1* «Мережа» загоряється лампочка *HL1*, що свідчить про цілісність запобіжників *FU1* і *FU2*.
2. При включенні контактора *KM1* загоряється сигнальна лампочка *HL2*.
3. При включенні контактора *KM2* загоряється сигнальна лампочка *HL3*.
4. При включенні контактора *KM3* загоряється сигнальна лампочка *HL4*.

Техніка безпеки

1. Пульт керування і агрегат повинні бути заземлені.
2. Опір ізоляції всіх ланцюгів повинен бути не менше $0,5 \text{ МОм}$.
3. Подачу живлення на регулятор *T1* «Рег» робити тільки при його «нульовому» положенні.

2 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ НАПРУГИ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ НА РОБОТУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

Мета роботи: придбати практичні навички дослідного дослідження впливу зміни напруги в контактній мережі на роботу тягового двигуна послідовного збудження шляхом зняття даних, розрахунку, побудови й аналізу його електромеханічних характеристик $n(I)$, $M_{em}(I)$, $\eta_{em}(I)$, що відповідають різним значенням напруги мережі; визначення відносної зміни струму навантаження двигуна при стрибкоподібній і плавній зміні напруги мережі; одержати експериментальне підтвердження теоретичним відомостям про вплив зміни напруги на роботу тягового двигуна.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зробити пуск двигуна при мінімальному навантаженні на його валу, перевірити можливість навантаження двигуна в робочому діапазоні зміни струму навантаження.
3. Зняти дані й побудувати швидкісні характеристики двигуна $n(I)$ при трьох різних заданих значеннях напруги мережі.
4. Розрахувати і побудувати характеристики $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $\eta_{em}(I)$.
5. Дослідити вплив плавної зміни напруги мережі на струм навантаження і частоту обертання двигуна при сталості струму навантаження генератора ($I_2 = const$).
6. Дослідити процес зміни струму й частоти обертання двигуна при різкій (стрибкоподібній) зміні напруги мережі і сталості струму навантаження генератора ($I_2 = const$).
7. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

В умовах експлуатації транспортного засобу напруга в контактній мережі змінюється. Зміни напруги в контактній мережі, викликані переміщенням потягів і зміною їхніх навантажень, безпосередньо впливають на напругу, підведену до тягових двигунів. Слід розрізняти тривалу поступову зміну напруги, при якій швидкість транспортного засобу встигає досягти значень, близьких до сталих, і різкі короткочасні поштовхи напруги.

У випадку тривалого зниження напруги, викликаного, наприклад, віддаленням транспортного засобу від пункту живлення при двигунах послідовного і незалежного збудження швидкість транспортного засобу знижується приблизно пропорційно напрузі, тому що не змінюється магнітний потік Φ . Тому для підтримки необхідної сили тяги не потрібне збільшення струму. У двигунів же паралельного збудження й у меншій мірі в двигуні змішаного збудження з паралельною обмоткою зниження напруги викликає зменшення струму збудження, а разом з ним і магнітного потоку. Тому швидкість руху знизиться в меншій мірі, але для збереження тієї ж сили тяги повинен збільшитися струм якоря. Зростання навантаження при зниженні напруги ускладнює умови роботи тягових двигунів, а також системи електропостачання, тому що приводить до збільшення втрати напруги в ній.

Значно не безпечнішими є різкі короткочасні поштовхи напруги, при яких швидкість транспортного засобу не встигає помітно змінитися. При цьому порушується електрична рівновага між прикладеною до тягового двигуна напругою, його ЕРС і спаданням напруги; через що виникає електричний перехідний процес зміни струму і сили тяги. Зміна сили тяги спричиняє зміну швидкості, яка після завершення електричних і механічних перехідних процесів досягає сталого значення, що відповідає новим умовам роботи двигуна. При цьому завдяки великій інерції потягів електричні перехідні процеси протікають значно швидше механічних, і в першому наближенні при аналізі явищ, зв'язаних

з різкими змінами напруги в контактній мережі, припустимо не враховувати електричні несталі режими.

Розглянемо процес зміни швидкості при зміні напруги на затискачах двигунів послідовного і змішаного збудження. На рисунку 1.1 наведені характеристики $v(I)$ при напругах U_1 (крива 1) і $U_2 < U_1$ (крива 2), а також загальна для обох напруг характеристика $F(I)$ (крива 3 на рис. 2.1, а) двигуна послідовного збудження (сила тяги двигуна послідовного збудження практично не залежить від напруги) і характеристики $F(I)$ при напругах U_1 (крива 3 на рис. 2.1, б) і $U_2 < U_1$ (крива 4 на рис. 2.1, б) двигуна змішаного збудження (сила тяги двигуна змішаного збудження залежить від напруги, тому що при зміні напруги змінюється потік Φ).

Припустимо, що потяг працює на ділянці з постійним ухилом при напрузі U_1 і рухається зі сталою швидкістю v_1 (точка а кривої 1) при силі тяги F_1 і струмі I_1 . Після зниження напруги до U_2 двигун перейде на роботу з характеристики 2, внаслідок чого його струм зменшиться до значення I_2 , що відповідає на цій характеристиці швидкості v_1 (точка б).

Зниження струму викликає зменшення сили тяги, що стане рівною F_2 . Оскільки при силі тяги F_1 потяг рухався зі сталою швидкістю, тобто опір руху W був рівний F_1 , то при силі тяги $F_2 < F_1$ рух транспортного засобу почне сповільнюватися. Унаслідок зниження швидкості буде збільшуватися струм і сила тяги двигуна доти, поки не наступить новий сталий режим при швидкості v_3 (точка с). Сила тяги F_3 при цьому режимі приблизно дорівнює початковому значенню F_1 , бо розходження між початковим і кінцевим значеннями цієї величини обумовлено тільки деяким зменшенням опору руху W через зниження швидкості з v_1 до v_3 . Струм I_3 двигуна послідовного збудження також приблизно дорівнює початковому значенню I_1 ($F_3 < F_1$ і $I_3 < I_1$). Струм I_3 двигуна змішаного збудження при $F_3 < F_1$ більше початкового значення I_1 ($I_3 > I_1$), тому що при зниженні напруги в цього двигуна знижується магнітний потік Φ .

У випадку різкого підвищення напруги, наприклад, від U_2 до U_1 процес буде протікати в зворотному порядку, як це показано на рисунку 2.1. У перший момент струм і сила тяги збільшаться відповідно до I_4 (точка d) і F_4 (точка e). У результаті

почне збільшуватися швидкість і знижуватися сила тяги доти, поки не стане знову рівною F_1 , тобто поки не буде досягнута колишня стала швидкість v_1 . При цьому струм I_1 двигуна послідовного збудження трохи більший струму I_3 ($I_1 > I_3$), а струм I_1 двигуна змішаного збудження менше струму I_3 ($I_1 < I_3$), тому що при підвищенні напруги в цього двигуна зростає магнітний потік Φ .

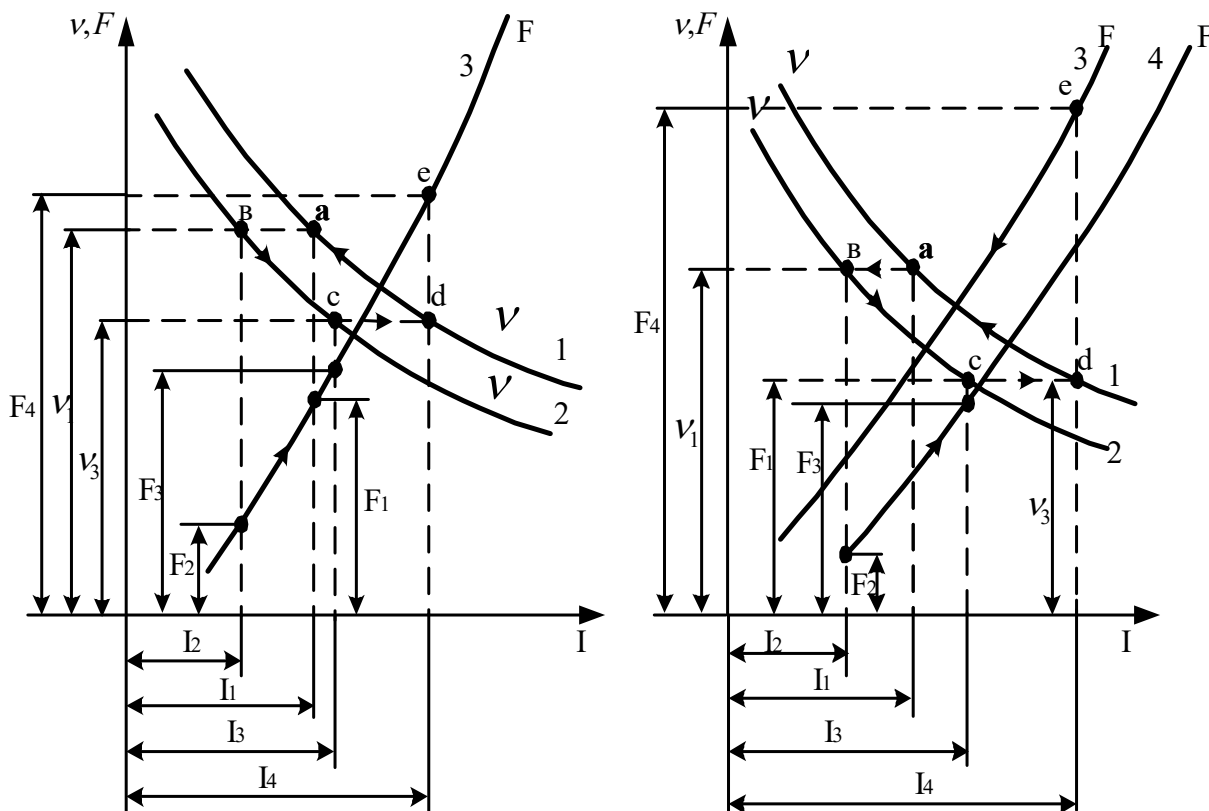


Рисунок 2.1 – Процес зміни швидкості під час стрибкоподібної зміни напруги:
 а) двигуна послідовного збудження; б) двигуна змішаного збудження

Очевидно, при короткочасних стрибкоподібних змінах напруги мережі струм тягових двигунів також змінюється стрибкоподібно. При різкому збільшенні напруги на ΔU після завершення електричного перехідного процесу відносно значення поштовху струму визначається виразом

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{U}{rI} \left(\frac{\Delta U}{U} - \frac{\Delta \Phi}{\Phi} \right) + \frac{\Delta \Phi}{\Phi},$$

де U, I і Φ – початкові значення напруги, струму;

$\Delta \Phi$ – зміна магнітного потоку двигуна, викликана збільшенням струму при послідовному збудженні або підвищенням напруги при паралельному.

Аналіз наведеного виразу показує, що в двигуні незалежного збудження кидок струму буде найбільшим, тому що в нього при наявності компенсаційної обмотки $\Delta\Phi=0$, а при її відсутності $\Delta\Phi<0$. У двигуні паралельного збудження струм збільшується менше, тому що зі зростанням напруги росте і магнітний потік ($\Delta\Phi>0$). Однак стале значення поштовху ΔI струму буде найменшим. Тут збільшення магнітного потоку $\Delta\Phi$ набагато більше, ніж у двигуні паралельного збудження, тому що воно визначається збільшенням струму ΔI , а не напруги ΔU . При цьому збільшення магнітного потоку в часі практично не відстає від зміни струму, тому що деяке відставання магнітного потоку від струму обумовлено тут тільки дією вихрових струмів. Унаслідок цього встигає зрости ЕРС, а отже, зміна струму обмежується.

Аналіз процесу зміни швидкості при коливаннях напруги виконаний у припущенні, що за час електричних перехідних процесів швидкість транспортного засобу не встигає помітно змінитися, тому струми I_2 і I_4 на *рис. 2.1* визначені відповідно при початкових швидкостях v_1 і v_3 . У дійсності ж за цей час швидкість може трохи змінитися, і тим значніше, чим менше механічна інерція транспортного засобу і чим більше електромагнітна інерція ланцюгів тягових двигунів. Унаслідок цього перехід з однієї швидкісної характеристики на другу відбувається не по прямій лінії, а по деякій кривій і відповідно зм'якшується кидок струму.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зробити пуск двигуна при мінімальному навантаженні на його валу. Схема для дослідження впливу зміни напруги мережі на роботу двигуна наведено на *рисунку 2.2*.

2. Установити ручку регулятора напруги $T1$ «*АТ*» у крайнє ліве положення ($U=0$), ручку реостата навантаження $R4$ «*Навант.*» генератора $G1$ перевести в крайнє ліве положення ($R=\max$). Включити автоматичний вимикач $SF1$ «*Мережа*» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $H11$, що сигналізує про справність плавкого запобіжника $FU1$ і подачі напруги на пульт керування), натиснути на кнопку $SB1.1$ «*Пуск*» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $H11$, що

сигналізує про подачу напруги на схему двигуна) і, плавно повертаючи ручку регулятора напруги PI « AT » за годинниковою стрілкою, установити на затискачах двигуна задану напругу за показанням вольтметра $PV1$ « U_C ». При цьому за показанням амперметра $PA1$ « I_{M1} » необхідно стежити, щоб струм двигуна при пуску не перевищував $8A$. Поворотом рукоятки реостата $R4$ «*Навант.*» за годинниковою стрілкою переконатися, що струм навантаження I_e генератора $G1$ (дивитися по амперметру $PA2$ « I_{G1} ») і струм навантаження I двигуна $M1$ зростають.

3. Зняти дані й побудувати швидкісні характеристики двигуна $n(I)$ при різних заданих значеннях напруги мережі. Після пуску двигуна і випробування його навантаження установити й далі підтримувати незмінним одне із заданих значень на-пруги мережі. При незмінній напрузі мережі, навантажуючи двигун, зняти швидкісну характеристику $n(I)$. Зміну навантаження двигуна здійснювати шляхом плавного повороту ручки реостата $R4$ «*Навант.*» При цьому змінюється струм

якоря генератора
$$I_2 = \frac{E_2}{r_2 + R4} = \frac{C_e \Phi_2 n}{r_2 + R4}$$
 і його електромагнітний момент

$M_{ем.г} = C_M \Phi_2 \cdot I_2$, спрямований проти обертання якоря. Необхідно одержати координати не менше п'яти точок кривої $n(I)$. У процесі експерименту струм двигуна не повинен перевищувати $8A$.

4. Сталі значення струму якоря двигуна I і частоти обертання n фіксувати за показаннями амперметра $PA1$ « I_{M1} » і вольтметра $PV2$ « n » і записувати в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для побудови характеристик двигуна $n(I)$, $c\Phi(I)$, $M_{ем}(I)$ і $\eta_{ем}(I)$ при різних значеннях напруги мережі

№ з/п	Експериментальні дані			Розрахункові дані				
	U , В	I , А	n , об/хв	$c\Phi$, $\frac{B}{\text{об}/\text{хв}}$	$M_{ем}$, Н·м	$P_{ем}$, Вт	P_1 , Вт	$\eta_{ем}$, %

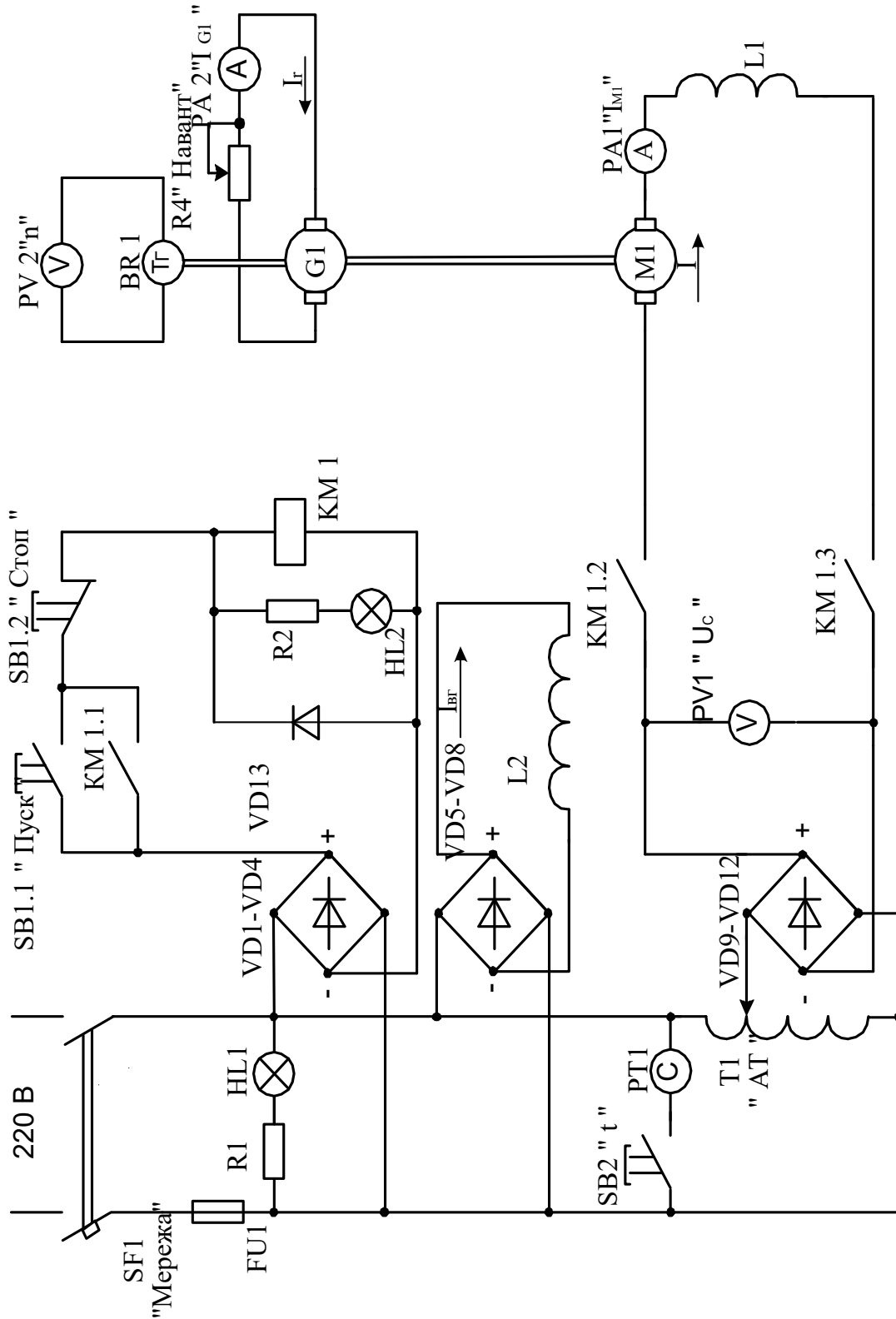


Рисунок 2.2 . 2.2 - Схема для дослідження впливу зміни напруги в контактній мережі на роботу тягового двигуна послідовного збудження

Аналогічно зробити вимір координат точок кривих $n(I)$ для всіх заданих значень напруги мережі. Результати вимірів записати в таблицю 2.1 і побудувати криві $n(I)$. Після закінчення експерименту ручку реостата навантаження $R4$

«Навант.» генератора GI перевести в крайнє ліве положення (мінімальний струм навантаження $I_{\text{сmin}}$), ручку регулятора напруги TI « AT » розгорнути проти годинникової стрілки до упора ($U=0$), натисканням кнопки $SB1.2$ «Зупинка» відключити двигун від живильної мережі, потім виключити вимикач SFI «Мережа» і зняти напругу з пульта керування випробувального стенда.

5. Розрахувати й побудувати характеристики $c\Phi(I)$, $M_{\text{ем}}(I)$ і $\eta_{\text{ем}}(I)$, що відповідають різним значенням напруги мережі. Величину $c\Phi$ визначити за експериментальними даними швидкісних характеристик $n(I)$ за формулою $c\Phi = \frac{U - rI}{n}$, де U – напруга на затисках двигуна, B , при якій знімалася характеристика $n(I)$; r – опір ланцюга двигуна, O_m (сума опорів послідовно з'єднаних обмоток якоря, додаткових полюсів і послідовної обмотки збудження). Значення r задається керівником.

Значення електромагнітного моменту $M_{\text{ем}}$, $H \cdot m$, і електромагнітного ККД $\eta_{\text{ем}}$, %, розрахувати за формулами:

$$M_{\text{ем}} = \frac{30}{\pi} c\Phi \cdot I = 9,55 c\Phi \cdot I; \eta_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{P_1} \cdot 100,$$

де $P_{\text{ем}}$ – електромагнітна потужність двигуна, $Вт$, визначена за формулою:

$$P_{\text{ем}} = M_{\text{ем}} \cdot \omega = \frac{\pi}{30} M_{\text{ем}} \cdot n = 0,1047 M_{\text{ем}} \cdot n$$

де P_1 – потужність, споживана двигуном з мережі, $Вт$, визначена за формулою:

$$P_1 = UI.$$

Розрахункові значення усіх величин занести в таблицю 2.1. За даними таблиці побудувати криві залежностей $c\Phi(I)$, $M_{\text{ем}}(I)$ і $\eta_{\text{ем}}(I)$, що відповідають різним заданим значенням напруги мережі. Криві $M_{\text{ем}}(I)$ побудувати на одному графіку з кривими $n(I)$ (див. рис. 2.1). Криві залежностей $c\Phi(I)$ і $\eta_{\text{ем}}(I)$ побудувати на окремих графіках. На всіх графіках масштаб струму m , $мм/А$ вибрати однаковим.

6. Дослідити вплив плавної зміни напруги мережі на струм навантаження і частоту обертання двигуна при сталості струму навантаження генератора ($I_2 = const$).

Експеримент провести в такій послідовності:

- Відповідно до п.1 зробити пуск двигуна.
- Установити одне із заданих раніше значень напруги мережі (див. п.2).
- Стежити, щоб струм I якоря двигуна не перевищував $8 A$.
- Після виходу двигуна на автоматичну швидкісну характеристику $n(I)$, що відповідає заданій напрузі мережі, встановити задане значення струму навантаження I двигуна ($I > I_{min}$).
- Зафіксувати сталі значення струму навантаження генератора I_2 , струму навантаження двигуна I і частоти обертання n .
- Результати вимірів записати в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Вплив плавної зміни напруги мережі на роботу двигуна

№ з/п	U, B	I_2, A	I, A	$n, об/хв$

- Плавно змінити напругу мережі до іншого раніше заданого значення (див. п.2).
- За допомогою ручки реостата $R4$ «Навант.» установити колишнє значення струму навантаження генератора I_2 (необхідно при зміні напруги підтримувати $I_2 = const$) і зафіксувати сталі значення струму навантаження I і частоти обертання n двигуна при цій напрузі.
- Результати вимірів записати в таблицю 2.2.
- Потім знизити струм навантаження до I_{min} і відключити двигун і пульт керування від живильної мережі (див. п.2).
- Результати вимірів нанести на швидкісні характеристики й установити характер впливу плавної зміни напруги мережі на роботу (струм і частоту обертання) двигуна.

7. Дослідити процес зміни струму і частоти обертання двигуна при різкій (стрибкоподібній) зміні напруги мережі і сталості струму навантаження генератора ($I_2 = \text{const}$).

Експеримент зробити в такій послідовності:

- Зробити пуск двигуна відповідно до п.1.
- Вибрати два раніше заданих значення напруги мережі, наприклад, U_1 і U_2 або U_1 і U_3 .

- Плавним поворотом ручки регулятора напруги $T1$ « AT » установити вище з двох обраних значень напруги і відзначити положення покажчика ручки регулятора напруги, що відповідає цій напрузі.

- Поворотом ручки реостата $R4$ «*Навант.*» навантажити двигун таким чином, щоб струм якоря I був більше I_{\min} , але не перевищував $8 A$.

- У сталому режимі зафіксувати значення струму якоря генератора I_2 , струму якоря двигуна I і частоту обертання n при меншій напрузі.

- Результати вимірів записати в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення струму й частоти обертання при різкій зміні напруги мережі

№ з/п	U, B	I_2, A	I, A	$n, \text{об/хв}$

- Різко розгорнути ручку регулятора напруги $T1$ « AT » у положення, що відповідає обраному більшому значенню напруги мережі. При цьому напруга мережі стрибком підвищується до більшого значення.

- Зафіксувати значення струму якоря I_{\max} і частоти обертання n у момент стрибка напруги і записати в таблицю 2.3.

- Надалі, в міру зміни частоти обертання аж до нового сталого режиму підтримувати сталість струму якоря генератора ($I_2 = \text{const}$) і зафіксувати 3-5 значень струму якоря I і відповідні їм частоти обертання n .

- Результати вимірів записати в таблицю 2.3 і нанести на швидкісні характеристики, що відповідають обраним значенням напруги мережі.
- Оцінити вплив стрибків напруги мережі на струм навантаження тягового двигуна.
- Після закінчення експерименту знизити струм навантаження двигуна до I_{\min} , потім відключити двигун і пульт керування випробувального стенда від живильної мережі.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема випробувань (рис. 2.2).
2. Таблиці 2.1, 2.2, 2.3 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули.
3. Графіки з кривими залежностей $n(I)$ і $M_{em}(I)$, $c\Phi(I)$ і $\eta_{em}(I)$, що відповідають трьом заданим значенням напруги мережі.
4. Відобразити на кривих $n(I)$ і $M_{em}(I)$ процес зміни струму і частоти обертання при плавній і різкій зміні напруги мережі.
5. Висновки.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 1

1. Вплив плавної зміни напруги на швидкість і струм двигуна послідовного збудження.
2. Вплив плавної зміни напруги на швидкість і струм двигуна змішаного збудження.
3. Вплив стрибкоподібних змін напруги на струм двигунів різних систем збудження.
4. Вплив зміни напруги на ККД тягового двигуна.
5. Спрощений розрахунок швидкісних характеристик двигуна послідовного збудження при зміні напруги.
6. Вплив зміни напруги в контактній мережі на характеристики електромагнітного моменту $M_{em}(I)$ двигунів послідовного і змішаного збудження.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ДВИГУНАМИ

МЕТА РОБОТИ: придбати практичні навички дослідження впливу розбіжності швидкісних характеристик на розподіл навантаження між тяговими двигунами незалежного збудження при послідовному і паралельному їхньому з'єднанні за допомогою зняття даних, розрахунку, побудови й аналізу електромеханічних характеристик двигунів; одержати експериментальне підтвердження теоретичним зведенням про вплив розбіжності швидкісних характеристик на розподіл навантаження між двигунами, установленими на одній одиниці транспортного засобу.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зробити пуск двигунів $M1$ і $M2$, при заданій напрузі мережі зняти дані й побудувати швидкісні характеристики $n(I)$ цих двигунів.
3. Для кожного двигуна $M1$ і $M2$ розрахувати й побудувати характеристики $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $P_{em}(I)$.
4. Зробити пуск послідовно з'єднаних двигунів $M1$ і $M2$, при заданій напрузі мережі зняти дані й побудувати узагальнену швидкісну характеристику $n(I)$ двигунів.
5. Зробити паралельне з'єднання двигунів $M1$ і $M2$, зняти дані й побудувати криві залежностей $n(I)$ для кожного двигуна.
6. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

У процесі виготовлення і ремонту тягових двигунів можливі деякі відхилення від проектних значень параметрів, що визначають їхні тягові властивості. Це в першу чергу розходження в магнітних опорах ділянок магнітопроводу, в опорах обмоток двигунів, у величинах повітряного зазору.

З усіх їх причин характеристики окремих двигунів того самого типу й однієї партії не повністю збігаються один з одним. Для тягових двигунів постійного струму потужністю понад 40 до 150 кВт ($40 < P \leq 150 \text{ кВт}$) відхилення частоти обертання в точці, що відповідає номінальному режиму, від частоти обертання, установленої за типовою характеристикою при струмі, що відповідає номінальній потужності, і номінальному збудженні, повинні бути не більше $\pm 4\%$, для двигунів, які працюють на рухомому складі індивідуально, відповідно не більше $\pm 6\%$.

Крім того, розходження характеристик двигунів виникає при різниці діаметрів рушійних коліс (колісних пар).

При неоднакових діаметрах коліс швидкості їхнього обертання, а отже і швидкості обертання якорів двигунів, будуть обернено пропорційні діаметрам, тому що швидкість поступального руху всіх коліс екіпажу (вагону) однакова.

Розходження характеристик швидкості викликає нерівномірність розподілу навантажень між двигунами, установленими на одній одиниці електротранспортного засобу. Нерівномірність у навантаженнях приводить до зниження загальної сили тяги, до перегріву найбільш завантажених двигунів і буксування їхніх колісних пар (коліс).

Ступінь нерівномірності розподілу навантажень між двигунами залежить не тільки від ступеня розбіжності їхніх характеристик, але також від схеми включення двигунів і форми (твердості) їхніх характеристик.

У випадку паралельного включення (рис. 2.3, а) двигуни споживають різні струми і, як наслідок, розвивають різні сили тяги. Ступінь нерівномірності залежить від твердості характеристик тягових двигунів (див. рис. 2.3, б). Чим більше твердість характеристик паралельно включених тягових двигунів, тим більше розходження струмів і сил тяги цих двигунів. Найменше ці розходження в двигунах послідовного збудження з відносно м'якими характеристиками, трохи більше в двигунів погоджено-змішаного збудження і найбільші в двигунів паралельного і незалежного збудження, характеристики яких тверді.

При одній і тій же частоті обертання ЕРС менш швидкохідного двигуна (характеристика розташована нижче) буде більшою (у цього двигуна більший магнітний потік), унаслідок чого струм цього $I = \frac{(U - E)}{r}$ двигуна буде меншим (при паралельному включенні напруга на кожному двигуні дорівнює напрузі мережі U). Таким чином, при паралельному включенні двигунів з незбіжними характеристиками перевантажуватися будуть більш швидкохідні двигуни.

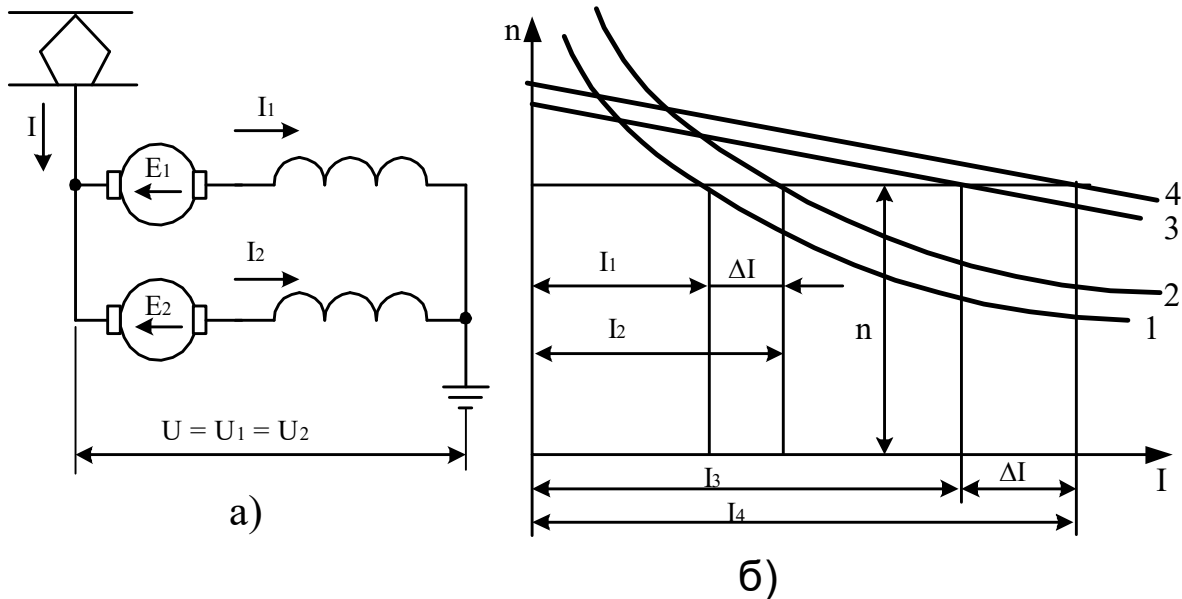


Рисунок 2.3 – Вплив жорсткості характеристик на розподіл навантаження між паралельно включеними двигунами: а) схема вмикання; б) швидкісні характеристики і розподіл навантаження

При послідовному з'єднанні двигунів (див. рис. 2.4, а), коли їхні струми однакові, розходження в характеристиках (див. рис. 2.4, б) приводить до перерозподілу напруг і сил тяги між ними. При однакових діаметрах коліс двигуни будуть обертатися з однаковою частотою

$$n = \frac{1}{\frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \frac{1}{n_i}}$$

де Z – число послідовно з'єднаних двигунів; n_i – частота обертання i -го двигуна при струмі I і напрузі U/Z . ЕРС і електромагнітні моменти, а отже, і електромагнітні сили тяги розподіляються між двигунами у співвідношенні:

$$E_1 : E_2 : \dots : E_Z := M_{EM1} : M_{EM2} : \dots : M_{EM} = \frac{I}{n_1} : \frac{I}{n_2} : \dots : \frac{I}{n_Z}$$

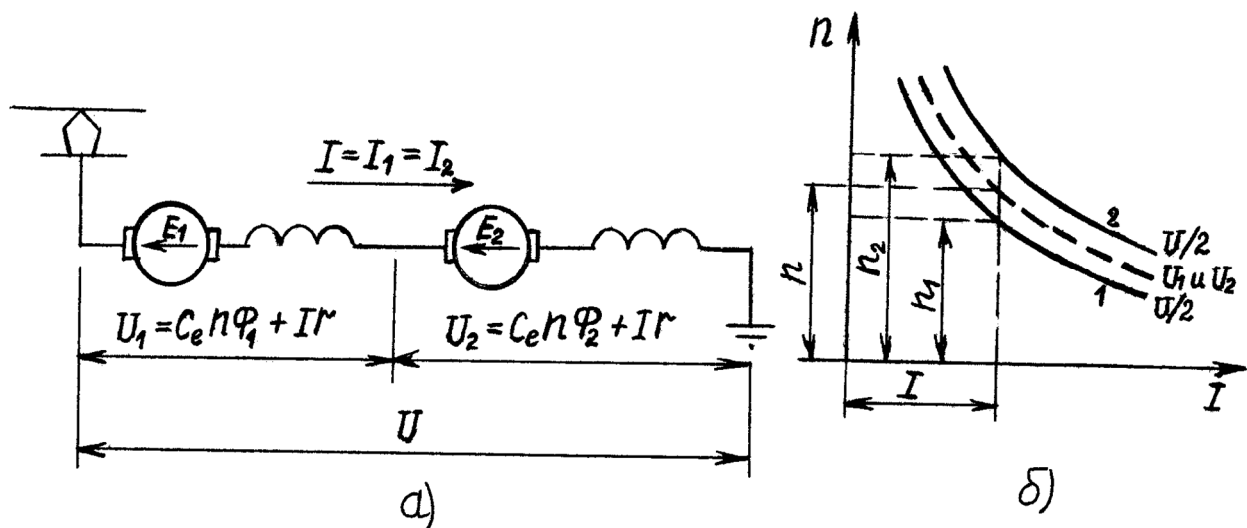


Рисунок 2.4 – Перерозподіл напруг між послідовно включеними двигунами (а), характеристики яких не співпадають (б)

Таким чином, при послідовному з'єднанні двигунів розходження в електромагнітних моментах, що розвиваються ними, і силах тяги значно менше, ніж при паралельному: воно залежить не від твердості характеристик, а від відхилень швидкісних характеристик. При цьому на відміну від паралельного з'єднання найбільш навантаженими виявляються двигуни з меншою частотою обертання (менш швидкохідні двигуни), в яких при струмі I і частоті обертання n більше ЕРС і напруга.

Великий вплив на розподіл навантажень між двигунами робить розходження в діаметрах колісних пар. Неправильний підбір колісних пар для двигунів з незбіжними характеристиками (установка на колісну пару, що має більший діаметр, двигуна з більш високою характеристикою) може призвести до збільшення ступеня нерівномірності розподілу навантажень через більшу розбіжність характеристик двигунів на ободу колеса.

Щоб забезпечити однакову швидкість руху всіх колісних пар транспортного засобу, слід дотримуватися умови $n = const$, тобто добуток частоти обертання n якорів двигунів і діаметрів D відповідних колісних пар повинен бути однаковим. Ця умова означає, що під швидкохідний тяговий двигун варто підкочувати колісну пару з меншим діаметром і, навпаки, під тихохідний – колісну пару з великим діаметром.

Слід зазначити, що підбором діаметрів колісних пар можна компенсувати різницю електромеханічних характеристик двигунів тільки в незначних межах, тому що максимальна різниця діаметрів колісних пар за існуючими нормами не повинна перевищувати 1%. Тому треба прагнути до виготовлення тягових двигунів з найменшими розбіжностями електромеханічних характеристик.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема для дослідження розподілу навантаження між двигунами наведена на рисунку 2.5.

1. Зробити пуск двигунів $M1$ і $M2$, при заданій напрузі зняти дані й побудувати швидкісні характеристики $n(I)$ двигунів:

- Установити ручку регулятора напруги $T1$ «Рег» у крайнє ліве положення ($U=0$).

- Перемикач режимів роботи $SA1$ перевести в положення 3 – роздільна (одиначна) робота двигунів $M1$ і $M2$.

- Включити автоматичний вимикач $QF1$ «Мережа» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $HL1$, що сигналізує про справність плавких запобіжників $FU1$ і $FU2$ і про подачу напруги на пульт керування).

- Натиснути на кнопку $SB3.1$ « $M1$ », при цьому спрацює контактор $KM2$ (загориться сигнальна лампочка $HL3$) і своїми контактами зашунтує кнопку $SB3.1$ « $M1$ » (її можна буде відпустити) і підключити якір двигуна $M1$ до джерела постійної напруги – випрямляча $VD14...VD17$.

- Натиснути на кнопку $SB1.1$, при цьому спрацює контактор $KM1$ (загориться сигнальна лампочка $HL2$) і своїми контактами підключить регулятор напруги $T1$ «Рег» (безпосередньо) і обмотки збудження $L1$ і $L2$ двигунів $M1$ і $M2$ (через випрямляч $VD10...VD13$) до живильної мережі змінного струму напругою 220 В.

- Плавно повертаючи ручку регулятора напруги $T1$ «Рег» за годинниковою стрілкою, за показаннями вольт-метра $PV2$ « U_{M1} » встановити на затисках якоря двигуна $M1$ задане значення напруги. При цьому за показаннями

амперметра $PA2$ « I_{M1} » необхідно стежити, щоб струм двигуна не перевищував 7...8 А.

- У сталому режимі роботи двигуна без навантаження зняти показання вольтметра $PV4$ « n » і амперметра $PA2$ « I_{M1} ».

- Потім, підтримуючи напругу незмінною і навантажуючи двигун за допомогою механічного гальма, зробити 6-7 вимірів частоти обертання n і струму I_{M1} .

- Результати вимірів записати в таблицю 2.4.

- Обертаючи рукоятку механічного гальма проти годинникової стрілки, зняти навантаження з двигуна $M1$.

- Натиснути на кнопку $SB3.2$ « $M2$ », при цьому відключиться контактор $KM2$ (згасне лампочка $HL3$), що своїми контактами відключить двигун $M1$ від джерела живлення, і спрацює контактор $KM3$ (загориться лампочка $HL4$), що своїми контактами підключить якорь двигуна $M2$ до джерела живлення.

- Підтримуючи задане значення напруги на затисках якоря двигуна $M2$ (дивитися показання вольтметра $PV3$ « U_{M2} ») незмінним і поступово навантажуючи за допомогою механічного гальма двигун, зняти 6-7 показань вольтметра $PV4$ « n » і амперметра $PA3$ « I_{M2} ».

- Результати вимірів записати в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Дані для побудови електромеханічних характеристик двигунів $M1$ і $M2$

Номер двигуна	Експериментальні дані			Розрахункові дані		
	U , В	I , А	n , об/хв	$c\Phi$, $\frac{В}{об/хв}$	$M_{ем}$, Н·м	$P_{ем}$, Вт

- За даними таблиці побудувати на одному графіку швидкісні характеристики $n(I)$ двигунів $M1$ і $M2$.

- Зняти навантаження з двигуна $M2$.

- Регулятором напруги $T1$ «Рег» знизити напругу живлення двигуна до нуля.

- Натиснути на кнопку $SB1.2$, при цьому від-ключиться контактор $KM1$ і своїми контактами «зніме» живлення з регулятора й обмоток збудження двигунів.

- Натисканням на кнопку $SB2$ «Зупинка» зробити розбирання схеми випробувань двигунів.

- Відключити автоматичний вимикач $QF1$ «Мережа».

2. Розрахувати й побудувати характеристики $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $P_{em}(I)$ двигунів

$M1$ і $M2$. Величину $c\Phi$ визначити за експериментальними даними швидкісних характеристик $n(I)$ за формулою $c\Phi = \frac{U - rI}{n}$, де U – напруга на затискачах двигунів, V , при якій знімалися швидкісні характеристики $n(I)$; r – опір ланцюга якоря двигуна, Ω (сума опорів послідовно з'єднаних обмоток якоря і додаткових полюсів). Значення r задається викладачем.

3. Значення електромагнітного моменту M_{em} , $H\cdot m$, електромагнітної потужності P_{em} , Wt , споживаної потужності P_1 , Wt і електромагнітного ККД двигунів η_{em} , %, розрахувати за формулами:

$$M_{em} = \frac{30}{\pi} c\Phi I = 9,55 c\Phi I;$$

$$P_{em} = M_{em} \omega = \frac{\pi}{30} M_{em} n = 0,1047 M_{em} n.$$

4. Розрахункові значення усіх величин занести в таблицю 2.4. За даними таблиці побудувати криві залежностей $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $P_{em}(I)$. Криві залежностей $M_{em}(I)$ побудувати на одному графіку з кривими $n(I)$. Криві $c\Phi(I)$ і $P_{em}(I)$ побудувати на окремих графіках. На всіх графіках масштаб струму m , mm/A вибрати однаковим.

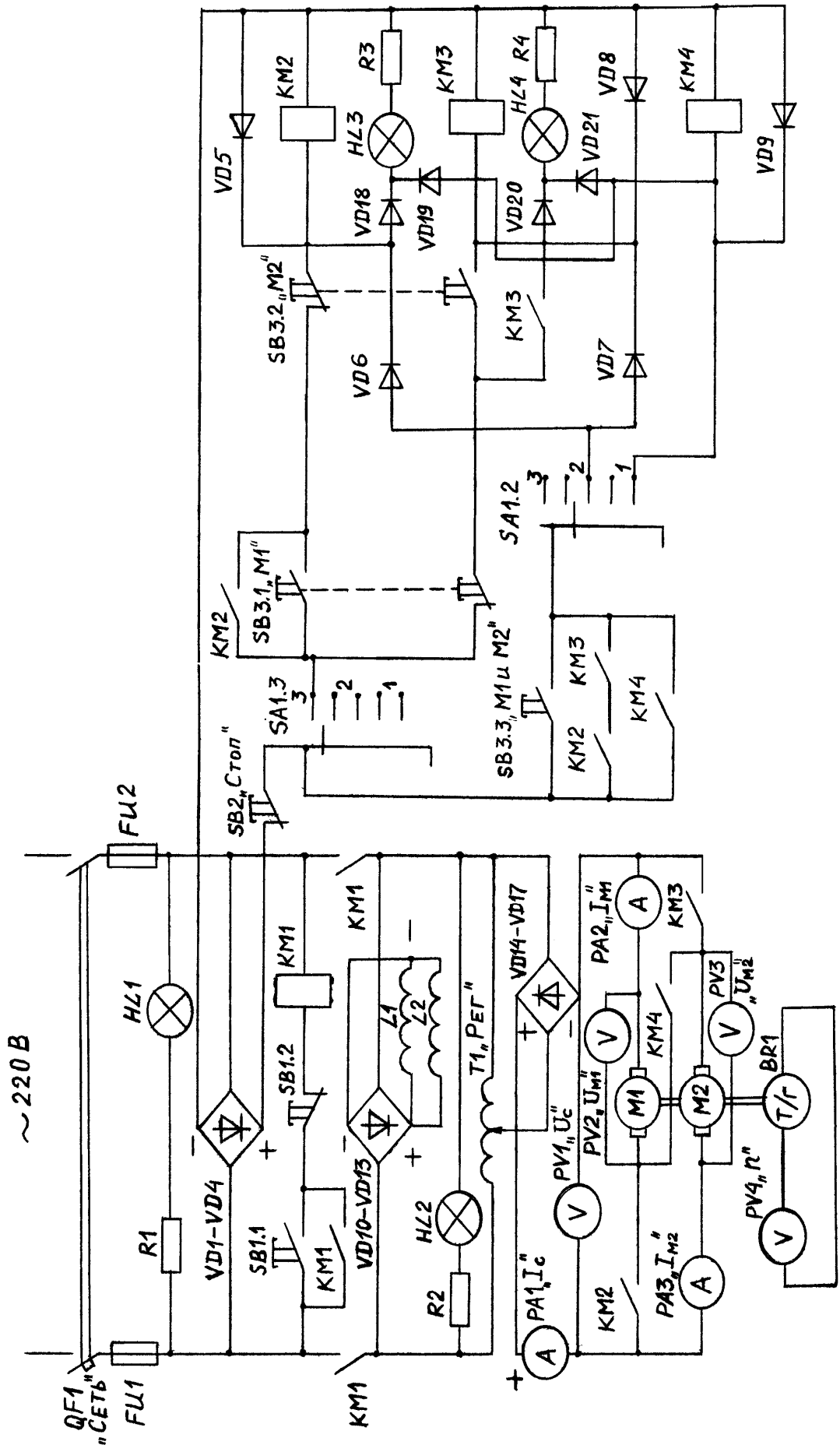


Рисунок 2. 5 – Схема для дослідження розподілу навантаження між двигунами

5. Зробити пуск послідовно з'єднаних двигунів $M1$ і $M2$, при заданій напрузі мережі зняти дані і побудувати узагальнену швидкісну характеристику двигунів:

- Установити ручку регулятора напруги $T1$ « Reg » у крайнє ліве положення ($U=0$).

- Перемикач режимів роботи $SA1$ перевести в положення I – послідовна робота двигунів $M1$ і $M2$.

- Включити автоматичний вимикач $QF1$ « $Мережа$ », потім натиснути на кнопку $SB3.3$ « $M1$ і $M2$ ». При цьому спрацює контактор $KM4$ (займуться сигнальні лампи $HL3$ і $HL4$), що своїми контактами зашунтує кнопку $SB3.3$ « $M1$ і $M2$ » (її можна буде відпустити) і з'єднає послідовно двигуни $M1$ і $M2$.

- Натиснути на кнопку $SB1.1$ і плавним поворотом ручки регулятора $T1$ « Reg » за годинниковою стрілкою установити за показаннями вольтметра $PV1$ « U_C » задане значення напруги мережі. При цьому за показаннями амперметра $PA1$ « I_C » необхідно стежити, щоб струм не перевищував $7-8$ А.

- У сталому режимі роботи двигунів без навантаження зняти показання вольтметрів $PV2$ « U_{M1} », $PV3$ « U_{M2} », $PV4$ « n » і амперметра $PA1$ « I_C ».

- Потім, підтримуючи напругу мережі незмінною і навантажуючи двигуни за допомогою механічного гальма, зробити $6-7$ вимірів частоти обертання n , струму навантаження I і напруг U_{M1} і U_{M2} .

- Результати вимірів занести в таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 – Дані для побудови швидкісної характеристики послідовно працюючих двигунів $M1$ і $M2$

№ з/п	$U_C, В$	$U_{M1}, В$	$U_{M2}, В$	$I, А$	$n, об/хв$

6. Включити двигуни паралельно, зняти дані й побудувати криві залежностей $n(I)$ для кожного двигуна. За допомогою механічного гальма зняти навантаження з послідовно працюючих двигунів $M1$ і $M2$. Натисканням на кнопку $SB2$ « $Зупинка$ » розібрати схему послідовного з'єднання двигунів (відключити контактор $KM4$,

який своїми контактами розірве ланцюг з'єднання двигунів, розшунтує кнопку SB3.3 «M1 і M2» і розірве ланцюг живлення сигнальних ламп HL3 і HL4):

- Ручку регулятора напруги T1 «Peg» перевести на нульову оцінку ($U_C=0$).
- Перемикач режимів роботи SA1 перевести в положення 2 – паралельна робота

двигунів M1 і M2.

- Натиснути на кнопку SB3.3 «M1 і M2». При цьому спрацюють контактори KM2 і KM3, що своїми контактами зашунтують кнопку SB3.3 «M1 і M2», з'єднають двигуни паралельно і підключать сигнальні лампочки HL3 і HL4 до джерела живлення.

- Плавним поворотом ручки регулятора T1 «Peg» установити задане значення напруги мережі за показаннями вольтметра PV1 « U_C ». При цьому за показаннями амперметра PA1 « I_C » стежити, щоб сумарний струм паралельно включених двигунів не перевищував 7-8 А.

- У сталому режимі роботи без навантаження записати у таблицю 2.3 показання вольтметра PV4 « n » і амперметрів PA1 « I_C », PA2 « I_{M1} » і PA3 « I_{M2} ».

- Потім, підтримуючи напругу мережі незмінною і навантажуючи двигуни за допомогою механічного гальма, зробити 6-7 вимірів частоти обертання n і струмів I_C , I_{M1} і I_{M2} .

- Результати вимірів записати в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Дані для побудови швидкісних характеристик паралельно працюючих двигунів M1 і M2

№ п/п	U_C , В	n , об/хв	I_{M1} , А	I_{M2} , А	$I_C=I_{M1}+I_{M2}$, А

- Зняти навантаження з двигунів.
- Регулятором напруги T1 «Peg» знизити напругу живлення двигунів до нуля.
- Натисканням на кнопку SB1.2 зняти напругу з регулятора й обмоток збудження двигунів.

- Натиснути на кнопку SB2 «Зупинка» (розбирання схеми випробування двигунів) і відключити автоматичний вимикач QF1 «Мережа».

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема випробувань двигунів (рис. 2.5).
2. Таблиці 2.4, 2.5, 2.6 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули і приклади обчислення за кожною формулою.
3. Графіки з кривими залежностей $n(I)$ і $M_{em}(I)$, $c\Phi(I)$ і $P_{em}(I)$. Криві залежностей $n(I)$ двигунів, що працюють роздільно і послідовно, побудувати на одному графіку (див. рис. 2.4, б). Швидкісні характеристики $n(I)$ паралельно працюючих двигунів побудувати на окремому графіку.
4. Висновки.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 2

1. Які основні причини розбіжності характеристик швидкості однотипних тягових електричних двигунів?
2. Поясніть вплив твердості характеристик на ступінь нерівномірності розподілу навантаження при паралельному й послідовному з'єднанні двигунів.
3. Який вплив розходження в діаметрах рушійних коліс на навантаження тягових двигунів послідовного й паралельного збудження при їх паралельному і послідовному з'єднанні?
4. Як можна зменшити розходження характеристик швидкості тягових двигунів?
5. При якому з'єднанні тягових двигунів паралельного збудження розходження в струмах навантаження буде менше?
6. Чим визначається ступінь нерівномірності навантажень паралельно включених тягових двигунів?
7. Чим визначається ступінь нерівномірності навантажень послідовно включених тягових двигунів?
8. До чого приводить розходження в характеристиках швидкості послідовно з'єднаних тягових двигунів?
9. До чого приводить розходження в характеристиках швидкості паралельно з'єднаних тягових двигунів?
10. При якому з'єднанні тягових двигунів розходження в силах тяги, що розвиваються, менше?

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОГО І СХІДЧАСТОГО РЕОСТАТНОГО ПУСКУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

МЕТА РОБОТИ: придбати практичні навички дослідного дослідження плавного і східчастого реостатного пуску транспортного засобу шляхом зняття даних, розрахунку, побудови й аналізу пускових діаграм, визначення коефіцієнтів нерівномірності пуску за струмом і моментом, побудови енергетичних діаграм пуску; одержати експериментальне підтвердження теоретичних відомостей про плавний і східчастий реостатний пуск транспортного засобу.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зняти дані й побудувати автоматичну (природну) швидкісну характеристику двигуна при заданій напрузі мережі.
3. Розрахувати й побудувати характеристики $c\Phi(I)$ і $M_{em}(I)$.
4. Зробити плавний реостатний пуск двигуна при заданих значеннях напруги мережі U_k і пускового струму I_p . За знятими даними побудувати пускову діаграму залежностей $R(n)$ і $n(I)$ (див. рис. 2.7).
5. Побудувати діаграми розподілу напруги і потужності в процесі плавного реостатного пуску (див. рис. 2.8 і 2.9). Час пуску t_n визначити експериментально.
6. Побудувати пускову діаграму східчастого реостатного пуску двигуна (див. рис. 2.10) при заданій кількості ступенів пускового реостата і заданому значенні максимального струму I_{max} . Визначити I_{min} , коефіцієнти нерівномірності пуску за струмом K_I і моментом K_M .
7. Зробити східчастий реостатний пуск двигуна при заданих значеннях напруги мережі U_k і струмів I_{min} і I_{max} .
8. За знятими даними побудувати діаграми залежностей $R(n)$ і $n(I)$, визначити значення опору R на кожній пусковій позиції (див. рис. 2.11).
9. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

Рух на перегоні починається із зрушення нерухомого транспортного засобу ($v=0$). У цей момент ЕРС $E=vc\Phi$ тягових двигунів дорівнюють нулю і струми їх визначаються відношенням прикладеної напруги до опору силового ланцюга.

Включення нерухомих тягових двигунів безпосередньо на номінальну напругу $U_{ном}$ привело б до короткого замикання, при якому струм двигуна $I_{кз} = \frac{U_{ном}}{r}$ на багато разів перевищував би допустимий. Тому при зрушенні транспортного засобу необхідно вживати заходи до обмеження пускового струму. У системі постійного струму з контактним-реостатним керуванням для цієї мети послідовно з тяговими двигунами включають резистори R – так звані пускові реостати, в яких поглинається частина напруги (рис. 2.6).

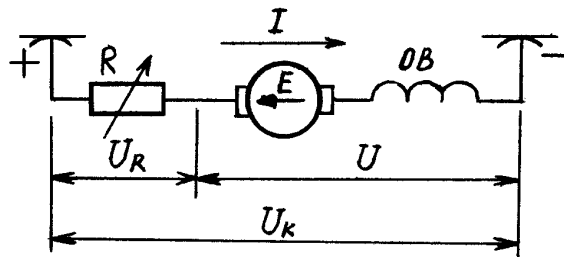


Рисунок 2.6 – Схема вмикання пускового резистора R під час пуску тягового двигуна постійного струму

Коли якорі тягових двигунів починають обертатися, виникає ЕРС, спрямована назустріч прикладеній напрузі. Тому при незмінній напрузі контактної мережі U_k і опорі силового ланцюга $r+R$, де r – опір якорного ланцюга двигуна, струм двигуна $I = \frac{U_k - v \cdot C\Phi}{r + R}$ зменшується зі збільшенням швидкості.

Поступово виводячи пусковий реостат, можна або підтримувати пусковий струм постійним, або змінювати його за заданим законом. Подібний процес розгону поїзда продовжується до так званої пускової швидкості v_n , при якій двигун переходить на роботу за природною (автоматичною) характеристикою швидкості $v(I)$, що відповідає $R=0$ і $U=U_k$ (рис. 2.7).

Пусковий період дуже впливає на процес руху транспортного засобу, параметри цього періоду необхідно вибирати так, щоб забезпечувалися найбільш економічні та безпечні умови його роботи. Пуск транспортного засобу повинен бути плавним, тобто рух рівномірно прискореним. Пускове прискорення, а отже, пускову силу тяги і пусковий струм необхідно вибирати якомога великими. Зі збільшенням пускового прискорення підвищується ходова (середня) швидкість руху транспортного засобу і зменшуються втрати в пусковому резисторі, що особливо важливо для міського транспорту, тому що внаслідок коротких перегонів пуски досить часті. Крім того, зі збільшенням прискорення при одній і тій же ходовій швидкості зменшується витрата енергії. Однак величина пускового прискорення обмежена умовами зчеплення і найбільшим припустимим струмом (потужністю) тягових двигунів. Тому пуск транспортного засобу доцільно здійснювати при найбільшому припустимому за цими обмеженнями струмі двигунів, підтримуючи цей струм по можливості незмінним протягом пускового періоду. Незмінному пусковому струму I_n відповідає незмінний магнітний потік Φ_n , а отже незмінна пускова сила тяги F_n і приблизно (при невеликих швидкостях опір руху транспортного засобу змінюється мало) постійне пускове прискорення a_n .

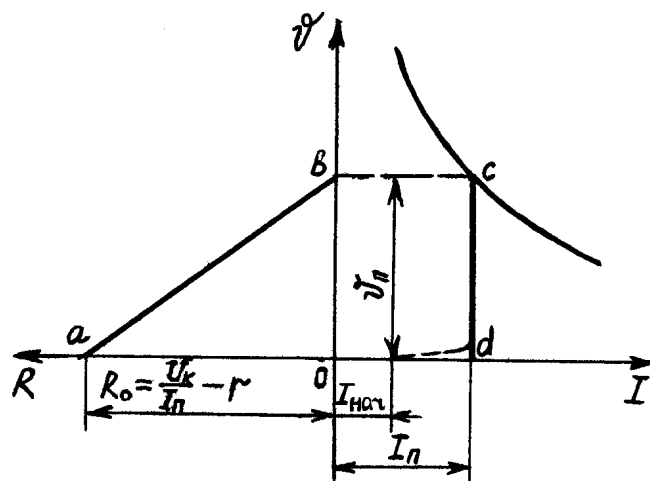


Рисунок 2.7 – Залежності $v(I)$ і $R(v)$ під час плавного реостатного пуску

Щоб забезпечити плавний пуск і усунути удари в передачі від валу двигуна до рухомих коліс і в зчіпних приладах, треба обмежити струм у момент включення тягових двигунів, і потім поступово збільшувати його, а тим самим і

силу тяги до найбільших припустимих значень, при яких здійснюється пуск транспортного засобу.

Для розгону двигуна з незмінним пусковим струмом I_n необхідно змінювати опір пускового реостата в лінійній залежності від швидкості

$$R = R_0 \cdot \left(I - \frac{v}{v_n} \right),$$

де R_0 – початковий пусковий опір, що відповідає моменту зрушення транспортного засобу ($v=0$):

$$R_0 = \frac{v_\kappa}{v_n} - r .$$

Залежності $v(I)$ і $R(v)$ при плавному реостатному пуску подані на рисунку 2.7.

На рисунку 2.8 показані зміни напруги й ЕРС для випадку пуску одного тягового двигуна з незмінним пусковим струмом. Для спрощення не враховані механічні й магнітні втрати в двигуні і прийнятий постійний опір руху транспортного засобу протягом усього періоду пуску. У цих умовах прискорення транспортного засобу a_n постійне, швидкість – пропорційна часу t , тобто $v=a_n t$, загальний час пуску $t_n = \frac{v_n}{a_n}$, а рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U_\kappa = U + U_R = E + rI_n + I_n R = c\Phi_n \cdot v_n \frac{t}{t_n} + rI_n + I_n \cdot R_0 \left(1 - \frac{t}{t_n} \right).$$

У довільний момент часу ордината MN зображує у визначеному масштабі ЕРС, NK – спадання напруги в двигуні, сума цих ординат, тобто ордината MK – напругу на двигуні і KL – спадання напруги в реостаті.

Помноживши всі значення ординат на пусковий струм I_n , одержимо діаграму розподілу потужностей під час реостатного пуску (рис. 2.9). Тут лінія 1 характеризує електромагнітну потужність двигуна EI_n ; оскільки не враховуються механічні й магнітні втрати, ця лінія відповідає і корисній потужності двигуна. Лінією 2 подана потужність UI_n , підведена до двигуна, лінією 3 – потужність $U_{\kappa}I_n$, споживана з мережі.

Різниця ординат ліній 2 і 1 виражає потужність втрат rI_n^2 у двигуні, а різниця ординат ліній 3 і 2 – потужність втрат RI_n^2 у пусковому реостаті.

Оскільки енергія дорівнює інтегралу потужності за часом, то площі, обмежені лініями потужностей, являють собою відповідні витрати енергії. Отже, корисна робота двигуна за весь час пуску зображується площею трикутника $0ab$, втрата енергії в двигуні – площею $0cda$, втрати в пусковому реостаті – площею ced і, нарешті, вся енергія, взята з мережі, – площею прямокутника $0edb$. Коефіцієнт пропорційності між енергією втрат у пусковому реостаті і корисно витраченою енергією за час пуску називають коефіцієнтом пуску K_n . При пуску одного двигуна або однієї групи двигунів

$$K_n = \frac{S_{ced}}{S_{0ab}} = 1. \text{ При застосуванні в процесі пуску перегрупування двигунів } K_n < 1.$$

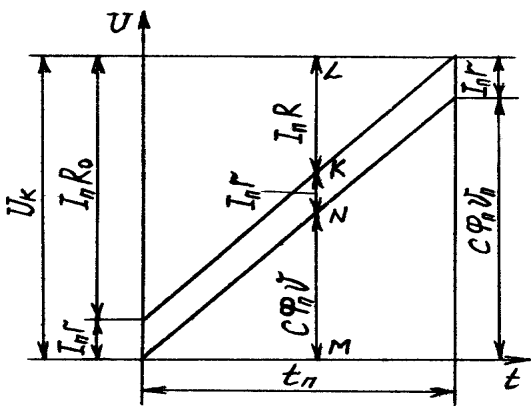


Рисунок 2.8 – Діаграма розподілу напруги під час плавного реостатного пуску тягового двигуна

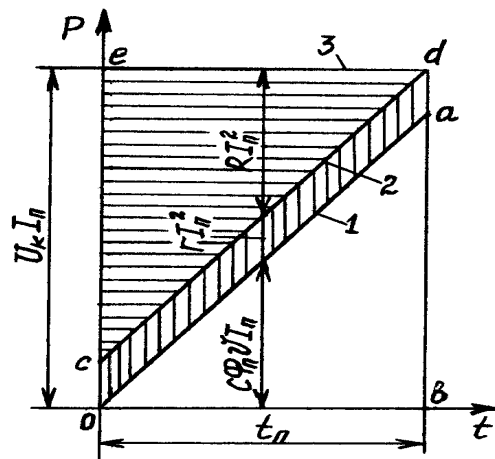


Рисунок 2.9 – Діаграма розподілу потужності в процесі плавного реостатного пуску тягового двигуна

Плавна зміна опорів пускового реостата, що забезпечує сталість пускового струму, пов'язана зі значними конструктивними труднощами. Тому пускові реостати виводяться в більшості випадків не безупинно, а окремими частинами, що називаються **ступенями**. При цьому відбувається коливання пускового струму. Ці коливання струму прагнуть обмежити по можливості вузькими межами від деякого мінімального значення I_{\min} до максимального I_{\max} (рис. 2.10).

Максимальний пусковий струм визначається припустимим навантаженням тягового двигуна або умовами зчеплення: $I_{nmax} < I_{max}$, $F_{nmax} \leq 1000 G_{o.cy} \psi$, де I_{nmax} – максимально припустимий струм тягового двигуна; F_{nmax} – сила тяги двигуна при максимальному пусковому струмі, $G_{o.cy}$ – вага, що приходить на одну вісь, яка рухається. Максимальний пусковий струм вибирається за однією з цих нерівностей, що дає менше значення струму.

Середній пусковий струм $I_{nmax} = \frac{I_{nmax} + I_{nmin}}{2}$. Отже, чим більше мінімальний пусковий струм, тобто чим менше коливання пускового струму, тим більші середній пусковий струм, середня пускова сила тяги і середнє прискорення пуску.

Нерівномірність пускового струму характеризується коефіцієнтом нерівномірності $K_I = \frac{\Delta I_n}{I_n}$, де ΔI_n – відхилення пускового струму від середнього значення:

$$\Delta I_n = I_{nmax} - I_n = I_n - I_{nmin} = \frac{I_{nmax} + I_{nmin}}{2}.$$

Використовуючи співвідношення $\Delta I_n = K_I \cdot I_n$, одержуємо $I_n = \frac{I_{nmax}}{1 + K_I}$ і $I_{nmin} = I_n(1 - K_I)$. Для збільшення I_n при заданому I_{nmax} необхідно зменшувати K_I і, отже, збільшувати число реостатних ступенів, що ускладнює апаратуру керування.

Коефіцієнт нерівномірності сили тяги $K_F = \frac{\Delta F_n}{F_n} > K_I$, тому що коливання сили тяги, що залежить від добутку струму і магнітного потоку, трохи більше коливань пускового струму. Ще більше коефіцієнт нерівномірності прискорення транспортного засобу $K_a = \frac{\Delta a_n}{a_n} = \frac{\Delta F_n}{F_n - W} = K_F \frac{F_n}{F_n - W}$.

Значення K_a тим більше, чим більший опір руху і, отже, менше прискорення транспортного засобу.

Побудова східчастої діаграми реостатного пуску при одному двигуні або одному угрупованні двигунів показана на рисунку 2.10.

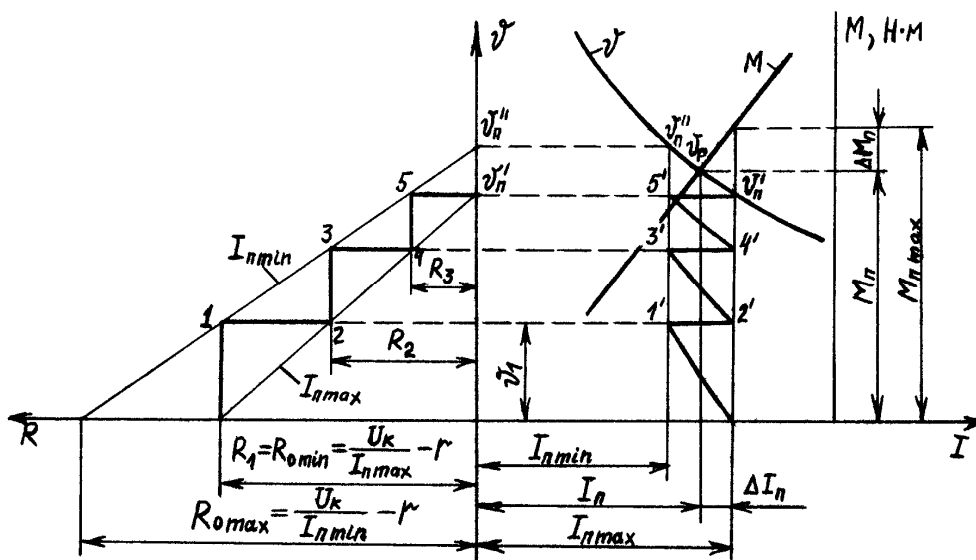


Рисунок 2.10 – Східчаста діаграма реостатного пуску тягового двигуна

Як видно з рисунка, в системі координат $R-v$ діаграма такого пуску має вигляд ламаної лінії, що складається із таких один за другим вертикальних і горизонтальних відрізків. Ламана лінія пуску вписана між двома прямими $R(v)$ при $I=I_{\min}$ і $I=I_{\max}$ так, що кінці її по черзі перетинаються з верхньою і нижньою граничними лініями. Побудову прямих $R(v)$ виконують за двома точками: для I_{\min} $(0; v_n'')$ і $(R_{0\max}; 0)$, для I_{\max} $(0; v_n')$ і $(R_{0\min}; 0)$;

$$R_{0\max} = \frac{U_{\kappa}}{I_{n\min}} - r; \quad R_{0\min} = \frac{U_{\kappa}}{I_{n\max}} - r.$$

У перший момент включення при $v=0$ повинен установитися струм I_{\max} , тобто опір першої ступені пускового реостата має дорівнювати $R_{0\min}=R_1$; далі, при $R_1=const$ швидкість зростає і сила струму зменшується. У точці 1, тобто при швидкості v і струмі I_{\min} потрібно вимкати частину пускового реостата. Величина опору другої ступені R_2 визначається точкою 2, що знаходиться перетином прямої, яка проходить через точку 1 паралельно осі R , з прямою $R(v)$, що відповідає I_{\max} . Для знаходження опору третьої ступені R_3 через точку 2 необхідно провести пряму паралельно осі v до перетину з прямою $R(v)$, що відповідає I_{\min} , у точці 3 і далі через точку 3 провести пряму паралельно осі R до перетину з прямою $R(v)$, що відповідає I_{\max} , у точці 4. Відрізок R_3 дає опір третьої ступені. Далі побудова продовжується в тому ж порядку. Звичайно при першій побудові на останній реостатній ступені при зниженні струму до

I_{\min} одержується швидкість більша, ніж швидкість v'_n , що відповідає струму I_{\max} , тобто режим пуску відрізняється від найвигіднішого, при якому на кожній ступені цілком використовуються межі коливання струму. Зміною меж коливання струму можна одержати швидкість на останній реостатній ступені при струмі I_{\min} , рівну v'_n , що відповідає за автоматичною характеристикою швидкості струму I_{\max} . Таким же способом можна розрахувати задане число ступенів пускового реостата.

На рисунку 2.11 показаний графічний розрахунок пускових опорів за заданою або отриманою експериментально струмовою діаграмою з неоднаковими межами коливання пускового струму. Для всіх значень пускових струмів I_1, I_2, \dots, I_5 знаходять початкові пускові опори $R_{01}, R_{02}, \dots, R_{05}$. За двома точками, як було описано вище, будують обмежуючі прямі для першої позиції $R_{01-v_{n1}}$ і $R_{02-v_{n2}}$, для другої – $R_{03-v_{n3}}$ і $R_{05-v_{n5}}$, для третьої – $R_{02-v_{n2}}$ і $R_{04-v_{n4}}$. У межах побудованих прямих, починаючи із значення R_{02} , вписують ламану лінію $R_{02-1-2-3-4-5-v_{n5}}$, що визначає величину пускового опору на кожній реостатній позиції.

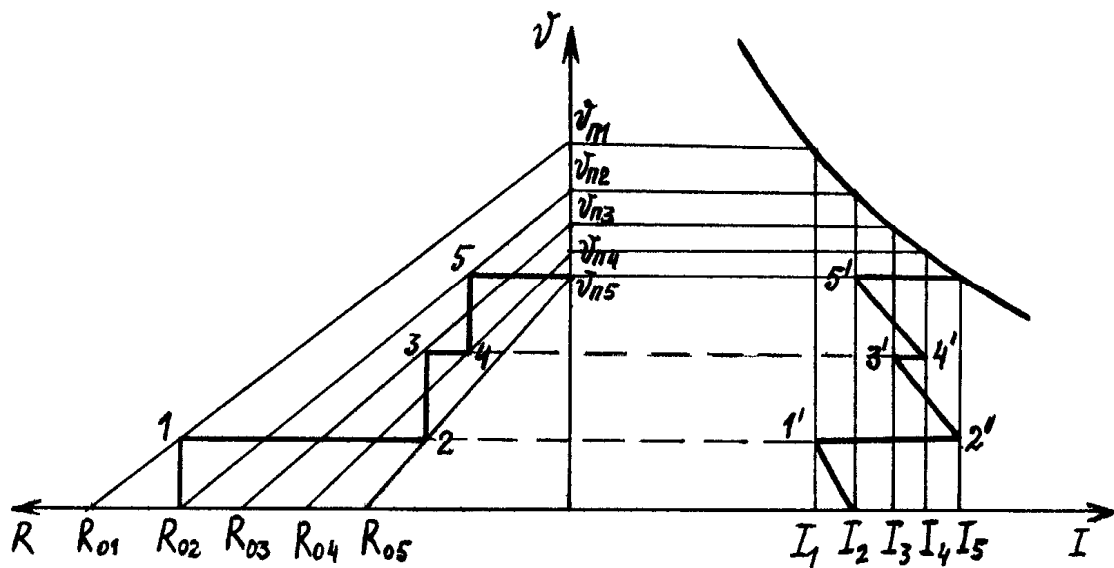


Рисунок 2.11 – Графічний розрахунок пускових опорів при різних границях коливання пускового струму

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зняти дані й побудувати автоматичну швидкісну характеристику $n(I)$ двигуна при повному полі і заданій напрузі мережі:

- Установити фальш-вилку №1 у штепсельне гніздо X2 (установлено праворуч на бічній поверхні горизонтальної панелі пульта керування).

- Зробити пуск двигуна, зняти дані і побудувати швидкісну характеристику $n(I)$ двигуна при повному полі.

- Експериментальні дані записати в таблицю 2.7.

2. Розрахувати й побудувати характеристики $c\Phi(I)$ і $M_{em}(I)$. Величину $c\Phi$ визначити за експериментальними даними швидкісної характеристики $n(I)$ за

формулою $c\Phi = \frac{U - rI}{n}$, де U – напруга на затискачах двигуна, В, при якій знімалася швидкісна характеристика $n(I)$; r – опір ланцюга якоря двигуна, Ом.

Електромагнітний момент M_{em} , Н·м, двигуна розрахувати за формулою:

$$M_{em} = \frac{30}{\pi} c\Phi I = 9,55 c\Phi I .$$

Розрахункові значення потоку і моменту занести в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Дані для побудови характеристик $n(I)$, $c\Phi(I)$ і $M_{em}(I)$

№п/п	Експериментальні дані			Розрахункові дані		
	U , В	I , А	n , об/хв	r , Ом	$c\Phi$, $\frac{В}{об/хв}$	M_{em} , Н·м

За даними таблиці побудувати криві залежностей $c\Phi(I)$ і $M_{em}(I)$. Криву $M_{em}(I)$ побудувати на одному графіку з кривою $n(I)$.

3. Зробити плавний реостатний пуск двигуна при заданих значеннях напруги U_k і пускового струму I_n :

- При знеструмленому стенді вийняти зі штепсельного гнізда X2 фальш-вилку №1 і встановити в нього фальш-вилку №4.

- Установити ручку регулятора напруги Т1»АТ» у крайнє ліве положення ($U=0$), перемикач SA1»Режим» – у положення «Хід», перемикач вибору режиму

пуску двигуна $SA2$ – у положення «Плавно», ручку пускового реостата $R4 \gg R$ розгорнути вліво до упору ($R=R_{\max}$).

- Ввімкнути автоматичний вимикач $SF1 \gg \text{Мережа}$ (заго-рється сигнальна лампочка $H11$, що сигналізує про справність плавного запобіж-ника FUI і подачі напруги на пульт керування), поворотом ручки регулятора напруги $T1 \gg AT$ за годинниковою стрілкою установити за показанням вольтметра $PV1 \gg U_C$ задане значення напруги.

- Натисканням на кнопку $SB1.1 \gg \text{Пуск}$ зробити пуск двигуна, за амперметром $PA1 \gg I_{MI}$ зафіксувати початковий пусковий струм $I_{\text{поч}}$, потім поворотом ручки реостата $R4 \gg R$ за годинниковою стрілкою установити задане значення пускового струму I_n і підтримувати його незмінним протягом усього часу пуску t_n , тобто до повного виведення пускового реостата $R4 \gg R$ (ручка реостата повернена за годинниковою стрілкою до упору).

- У момент повного виведення пускового реостата за вольтметром $PV2 \gg n$ зафіксувати частоту обертання (швид-кість) n_n виходу двигуна на автоматичну характеристику.

- Час пуску t_n виміряти секун-доміром $PT1$, для цього одночасно з натисканням кнопки $SB1.1 \gg \text{Пуск}$ натиснути кнопку $SB2 \gg t$, а по закінченні пуску відпустити її.

- Дані експерименту занести в таблицю 2.8.

- За даними експерименту побудувати пускові діаграми залежностей $R(n)$ і $n(I)$

Таблиця 2.8 – Дані для побудови діаграм плавного реостатного пуску двигуна

Експериментальні дані				Розрахункові дані							
U_k , В	n , об/хв	I , А	t , с	R_0 , Ом	m_U , мм/В	m_t , мм/с	m_P , мм/Вт	$A_{\text{номр}}$, Вт·с	A_r , Вт·с	$A_{\text{корис}}$, Вт·с	$\eta_{\text{сер.пуску}}$, %
	0	$I_{\text{поч}}$	0								
								
								
	n_{Π}	I_{Π}	t_{Π}								

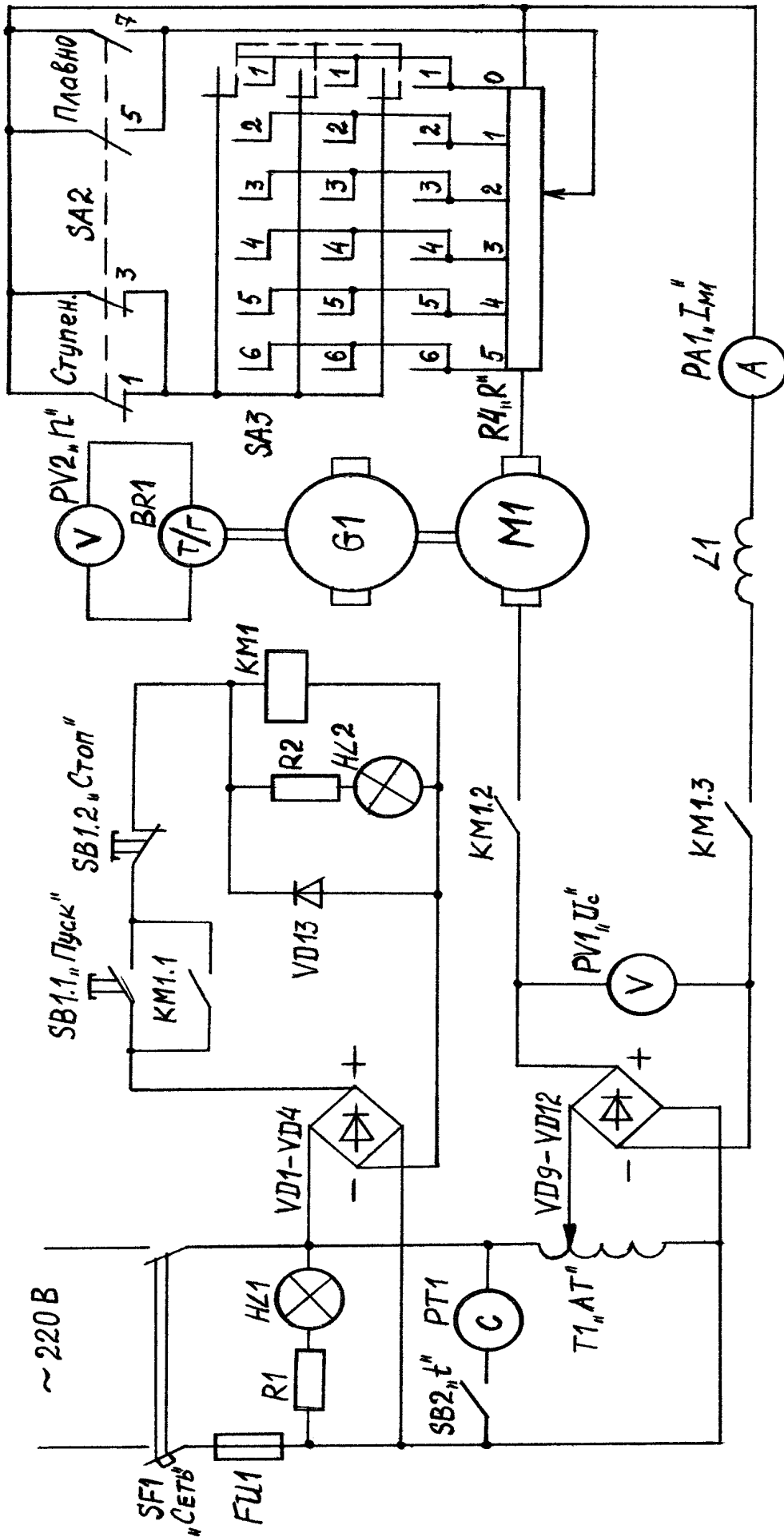


Рисунок 2.12 – Схема для дослідження плавного і східчастого реостатного пуску поїзда

4. Побудувати діаграми розподілу напруги і потужності в процесі плавного реостатного пуску:

- Діаграми (див. рис. 2.8 і 2.9) побудувати в обраних масштабах напруги u , мм/В, часу t , мм/с і потужності P , мм/Вт, використовуючи дані таблиці 2.8.

- Розрахувати енергію $A_{номр}$, Вт·с, споживану двигуном з мережі за час пуску $t_{п}$, корисно витрачену (електромагнітну) енергію $A_{корис}$, Вт·с, рівну енергії втрат у пусковому реостаті A_R , Вт·с, енергію втрат у двигуні A_r , Вт·с і середній ККД пуску $\eta_{сер. пуску}$, %, за такими формулами:

$$A_{номр} = U_k \cdot I_{п} \cdot t_{п}; \quad A_{номр} = A_R = \left(U_k \cdot I_{п} - r I_{п}^2 \right) \frac{t_{п}}{2};$$

$$A_r = r I_{п}^2 \cdot t_{п}; \quad \eta_{сер. пуску} = \left(\frac{A_{корис}}{A_{номр}} \right) \cdot 100.$$

- Розрахункові дані занести в таблицю 2.8.

5. Побудувати пускову діаграму східчастого реостатного пуску двигуна при заданій кількості ступенів пускового реостата і заданому значенні струму $I_{пmax}$:

- Діаграму (див. рис. 2.10) побудувати в обраних масштабах частоти обертання n , $\frac{мм}{об/хв}$, струму I , мм/А, опору R , мм/Ом і моменту M , $\frac{мм}{Н \cdot м}$

- Автоматичну характеристику швидкості $n(I)$ і моменту $M_{ем}(I)$ побудувати за даними таблиці 3.1.

- Задану кількість ступеней пускового реостата підібрати графічно шляхом зміни значення струму $I_{пmin}$.

- З побудованої діаграми визначити значення ступенів пускового реостата R_1, R_2, \dots, R_i , Ом, коефіцієнти нерівномірності пуску за струмом $K_I = \frac{\Delta I_{п}}{I_{п}}$

і моментом $K_M = \frac{\Delta M_{п}}{M_{п}}$.

6. Зробити східчастий реостатний пуск двигуна при заданих значеннях напруги мережі U і струмів I_{\min} і I_{\max} :

- Установити ручку регулятора напруги $T1$ « AT » у крайнє ліве положення ($U=0$), перемикач $SA1$ «Режим» – у положення «Хід», перемикач вибору режиму пуску двигуна $SA2$ – у положення «Східчасто», перемикач $SA3$ »Зупинка» – у положення «0» (максимальне значення опору пускового реостата $R4$ « R », $R0=R_{\max}$).

- Ввімкнути автоматичний вимикач SF «Мережа», поворотом ручки регулятора напруги $T1$ « AT » за годинниковою стрілкою установити за показанням вольтметра $PV1$ « U_C » задане значення напруги.

- Натисканням на кнопку $SBI.1$ «Пуск» зробити пуск двигуна, за амперметром $PA1$ « I_{M1} » зафіксувати і записати в таблицю 2.9 значення струму I_{\max} .

- При зниженні струму до значення I_{\min} виключити частину пускового опору, повернувши ручку перемикача $SA3$ »Зупинка» у положення «1». У момент переключення за вольтметром $PV2$ « n » зафіксувати значення частоти обертання n і за амперметром $PA1$ « I_{M1} » – значення струму I_{\max} .

- Результати вимірів записати в таблицю 2.9.

- Надалі східчасте зменшення пускового опору зробити аналогічно до виходу на автоматичну характеристику швидкості $n(I)$ (положення «5»).

- Дані експерименту занести в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Дані для побудови діаграм східчастого реостатного пуску двигуна

№ з/п	Експериментальні дані				Розрахункові дані				
	$U_k, В$	$n, об/хв$	$I_{\min}, А$	$I_{\max}, А$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$

- За знятими даними побудувати діаграми залежностей $n(I)$ і $R(n)$ і знайти значення R на кожній пусковій позиції (ступені) (див. рис. 2.11).

- Після закінчення експерименту знизити напругу на затискачах двигуна до нуля (ручку регулятора напруги $T1$ « AT » повернути вліво до упора) і виключити вимикач $SF1$ «*Мережа*».

- Ручку перемикача $SA3$ «*Зупинка*» встановити в положення « 0 ».

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема випробувань (рис. 2.12).
2. Таблиці 2.7, 2.8 і 2.9 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули і приклади обчислення за кожною формулою.
3. Пускові й енергетичні діаграми (рис. 2.7...2.11).
4. Висновки.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 3

1. Призначення пускового реостата.
2. Чому пуск транспортного засобу доцільно здійснювати з найбільшим допустимим струмом тягових двигунів?
3. Пояснити процес плавного реостатного пуску.
4. Пояснити процес східчастого реостатного пуску.
5. Що таке коефіцієнт нерівномірності пуску за струмом, силою тяги, прискоренням? В якому співвідношенні вони знаходяться?
6. Чим обмежується максимальне значення пускового струму?
7. Пояснити методику розрахунку і побудови пускової діаграми східчастого реостатного пуску транспортного засобу
8. Що таке коефіцієнт пуску?

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ НА РОБОТУ ТЯГОВОГО ДВИГУНА

МЕТА РОБОТИ: придбати практичні навички дослідження впливу ослаблення магнітного потоку на роботу тягового двигуна послідовного збудження шляхом зняття даних, розрахунку, побудови й аналізу його електромеханічних характеристик $n(I)$, $M_{em}(I)$ і $\eta_{em}(I)$; одержати експериментальне підтвердження теоретичних відомостей про вплив ослаблення магнітного потоку на роботу тягового двигуна.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зробити пуск двигуна при повному полі й мінімальному навантаженні на його валу, перевірити можливість навантаження двигуна в робочому діапазоні зміни струму навантаження.
3. Зняти дані й побудувати швидкісну характеристику двигуна $n(I)$ при повному полі ($\alpha_1=1$).
4. Зняти дані й побудувати швидкісні характеристики двигуна $n(I)$ при двох різних значеннях коефіцієнта регулювання збудження, менше одиниці ($\alpha_2 < 1$ і $\alpha_3 < \alpha_2$).
5. За експериментальними даними розрахувати значення коефіцієнта регулювання збудження $\alpha = \frac{I_B}{I}$.
6. Розрахувати і побудувати при повному й ослабленому магнітному потоці характеристики $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $\eta_{em}(I)$.
7. Дослідити процес зміни струму і швидкості двигуна при ослабленні його магнітного потоку шляхом зняття значень струму і швидкості на початку і вкінці перехідного процесу.
8. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму на міському електричному транспорті здійснюється, як правило, зміною напруги на двигуні за рахунок опору, що вводиться в ланцюг двигуна при пуску, і зміною магнітного потоку.

При виході двигуна на автоматичну (природну) характеристику на завершених пуску подальший розгін поїзда виконується зменшенням магнітного потоку – ослабленням поля. У двигунах послідовного збудження зменшення магнітного потоку здійснюється шунтуванням обмотки збудження резистором (див. рис. 4.1). У момент ослаблення поля струм якоря збільшується внаслідок зменшення ЕРС двигуна й опору ланцюга збудження, тому що обмотка збудження шунтується резистором. При цьому, внаслідок відносної малості спадання напруги rI у ланцюзі якоря, що складає кілька відсотків від підведеної до двигуна напруги U , невелике зменшення потоку Φ викликає в багато разів більше зростання струму якоря I і, отже, обертаючого електромагнітного моменту $M_{em} = C_m \cdot \Phi I$. У результаті на валу двигуна з'являється позитивний динамічний момент $M_{din} = M_{em} - M_c$, під впливом якого швидкість двигуна починає зростати. В міру зростання швидкості збільшується ЕРС, а струм якоря зменшується. Коли добуток $I \cdot \Phi$ стане рівним (з деяким наближенням) M_c / C_m , наступить новий сталий режим, при якому швидкість буде більше початкової.

Наприклад, припустимо, що при нормальному збудженні ЕРС $E = 0,9U$ і струм якоря $I = \frac{U - E}{r} = \frac{U(1 - 0,9)}{r} = \frac{0,1U}{r}$. При ослабленні потоку до значення $\Phi' = 0,8\Phi$, вважаючи, що в перший момент, унаслідок великої механічної інерції рухливого складу швидкість постійна, струм якоря зросте і стане рівним

$$I' = \frac{U - E'}{r} = \frac{U(1 - 0,9 \cdot 0,8)}{r} = \frac{0,28U}{r}. \quad \text{Тоді} \quad \frac{I'}{I} = 2,8, \quad \text{тобто} \quad I' = 2,8I;$$

$$\frac{M'_{em}}{M_{em}} = \frac{(C_m I' \Phi')}{(C_m I \Phi)} = 2,8 \cdot 0,8 = 2,24, \quad \text{тобто} \quad M'_{em} = 2,24 M_{em}.$$

Отже зменшення магнітного потоку на 20% від номінального в перший момент викликає збільшення струму якоря I у 2,8 рази й електромагнітного моменту M_{em} у 2,24 рази, в результаті чого кутова швидкість двигуна теж збільшується.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема для зняття характеристик двигуна при повному й ослабленому полі показана на рисунку. 2.13.

1. Зробити пуск двигуна при повному полі й мінімальному навантаженні на його валу:

- Установити ручку регулятора напруги $T1$ « AT » у крайнє ліве положення ($U=0$), автоматичний вимикач $SF2$ «Шунт OB » у положення «Відключено», ручку реостата навантаження $R4$ « R » генератора $G1$ перевести в крайнє ліве положення ($R=\max$).

- Включити автоматичний вимикач $SF1$ «Мережа» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $HL1$, що сигналізує про справність плавкого запобіжника $FU1$ і подачу на-пруги на пульт керування), натиснути на кнопку $SB1.1$ «Пуск» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $HL2$, що сигналізує про подачу напруги на схему двигуна) і, плавно повертаючи ручку регулятора напруги $T1$ « AT » за годинниковою стрілкою, встановити на затисках двигуна задану напругу за показаннями вольтметра PVI « U_C ». При цьому за показаннями амперметра $PA1$ « I_M » необхідно стежити, щоб струм двигуна при пуску не перевищував $8 A$. Переконатися, що при повороті рукоятки реостата $R4$ « R » за годинниковою стрілкою струм навантаження двигуна зростає.

- Зняти дані й побудувати характеристику двигуна $n(I)$ при повному полі ($\alpha_1=1$).

- Після пуску двигуна і випробування його навантаження установити на затискачах двигуна задану напругу і мінімальний струм навантаження.

- При сталому режимі записати в таблицю 2.10 значення струму і частоту обертання двигуна.

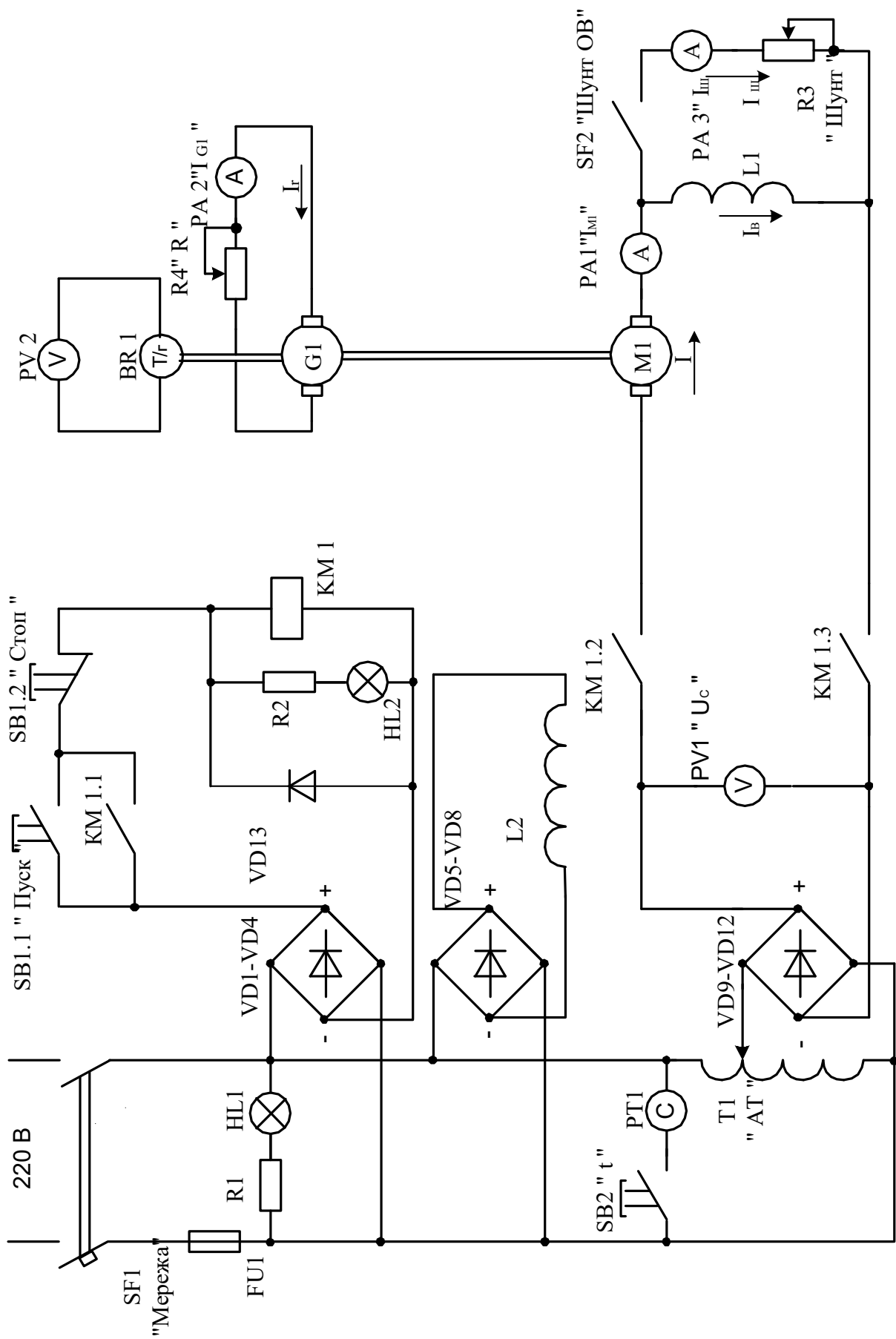


Рисунок 2.13 - Схема для дослідження впливу ослаблення магнітного потоку на роботу тягового двигуна послідовного збудження

- Для одержання координат інших точок швидкісної характеристики $n(I)$ при повному полі (необхідно одержати координати не менше п'яти точок) слід при незмінній напрузі на затискачах двигуна збільшити його струм навантаження і при сталому режимі фіксувати значення струму за показаннями амперметра $PA1$ « I_{M1} » і частоту обертання за показаннями вольтметра $PV2$ « n ».

- Струм навантаження двигуна $M1$ регулюється струмом навантаження генератора $G1$. При зменшенні опору в ланцюзі якоря генератора (опору реостата $R4$ «4») збільшується струм якоря I_e , а отже, і електромагнітний момент генератора, спрямований проти обертання якоря (вала двигуна). Струм двигуна змінювати в межах $I = 4 \dots 7 \text{ A}$

- Експериментальні дані записати в таблицю 2.10.

- Після закінчення експерименту ручку реостата навантаження генератора $R4$ «4» перевести в крайнє ліве положення (мінімальний струм навантаження); натисканням кнопки $SB1.2$ «Зупинка» відключити двигун від напруги мережі, ручку регулятора напруги $T1$ «AT» розгорнути в крайнє ліве положення, потім виключити вимикач $SF1$ «Мережа».

Таблиця 2.10 – Дані для побудови характеристик $n(I)$, $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $\eta_{em}(I)$

№ п/п	Експериментальні дані				Розрахункові дані							
	U , В	$I_{ш}$, А	I , А	n , об/хв	I_e , А	α	r , Ом	$c\Phi$, $\frac{B}{об/хв}$	M_{em} , Н·м	P_{em} , Вт	P_l , Вт	η_{em} , %

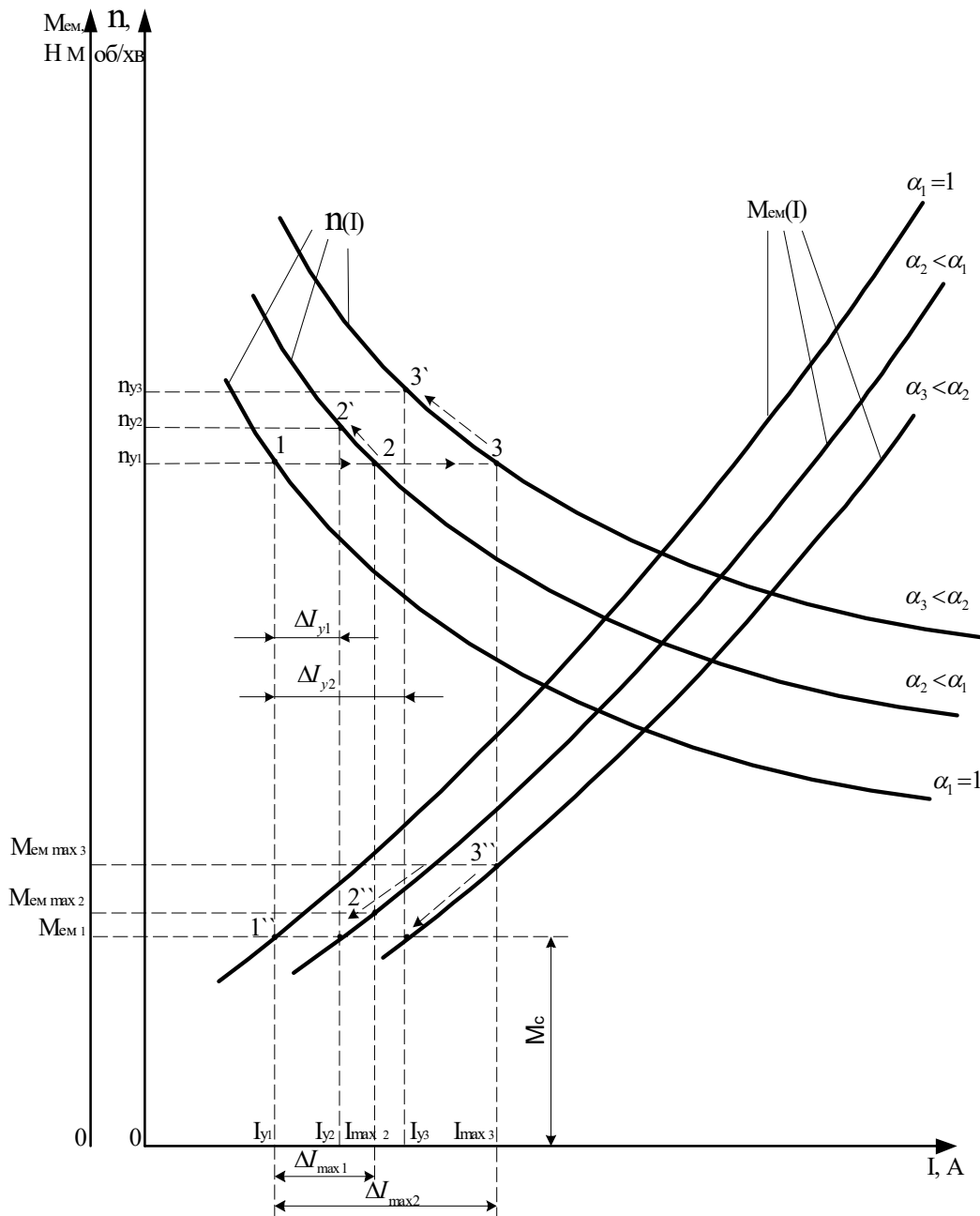


Рисунок 2.14 – Характеристики $n(I)$ і $M_{em}(I)$ двигуна послідовного збудження при повному і ослабленому полі

2. Зняти дані й побудувати характеристики двигуна $n(I)$ при ослабленому полі ($\alpha_2 < 1$ і $\alpha_3 < \alpha_2$):

- Зробити пуск двигуна відповідно до п.1.
- Установити автоматичний вимикач $SF2$ «Шунт ОВ» у положення «Включено».

- При крайньому лівому положенні ручки реостата $R4$ « R » (мінімальному струмі навантаження генератора і двигуна) поворотом рукоятки реостата $R3$ «Шунт» установити в шунті задане викладачем значення струму $I_{ш}$. На пульті керування **крейдою** чи **олівцем** відзначити положення рукоятки реостата $R3$ «Шунт» і, не змінюючи її положення, зняти дані для побудови характеристики $n(I)$ при ослабленому полі відповідно до п.2.

- Результати вимірів записати в таблицю 2.10.

- Аналогічно зробити зняття даних для побудови характеристики $n(I)$ при більшому значенні струму $I_{ш}$, результати вимірів записати в таблицю 2.10.

За даними таблиці 2.10 побудувати криві $n(I)$ при повному й ослабленому полі (див. рис. 2.14).

3. За формулою $\alpha = \frac{I_B}{I} = \frac{I - I_{ш}}{I}$ розрахувати значення коефіцієнта регулювання збудження, результати розрахунку записати в таблицю 2.10.

4. Розрахувати і побудувати при повному й ослабленому магнітному потоці характеристики $c\Phi(I)$, $M_{ем}(I)$ і $\eta_{ем}(I)$. Величину $c\Phi$ визначити за експериментальними даними швидкісних характеристик двигуна $n(I)$ за формулою

$$c\Phi = \frac{U - rI}{n},$$

де U – напруга на затисках двигуна, V , при якій знімалися швидкісні характеристики $n(I)$; r – опір ланцюга двигуна, $Ом$,

$$r = r_{Я} + \alpha r_B,$$

де $r_{Я} = r_{ОЯ} + r_{ДП}$ – сума опорів обмоток якоря і додаткових полюсів, $Ом$;

r_B – опір послідовної обмотки збудження, $Ом$.

При розрахунках можна прийняти $r_{Я} = 6,5 \text{ Ом}$, $r_B = 3,5 \text{ Ом}$.

Значення електромагнітного моменту $M_{ем}$, $Н\cdot м$, і електромагнітного ККД $\eta_{ем}$, % розрахувати за формулами;

$$M_{em} = \frac{30}{\pi} c\Phi I = 9,55 \cdot c\Phi I;$$

$$\eta_{em} = \frac{P_{em}}{P_I} \cdot 100,$$

де P_{em} – електромагнітна потужність двигуна, $Вт$, визначається за формулою $P_{em} = M_{em} \cdot \omega = 0,1047 M_{em} \cdot n$.

P_I – потужність, споживана двигуном з мережі, $Вт$, визначається за формулою $P_I = UI$.

Розрахункові значення усіх величин занести в таблицю 2.10. За даними таблиці побудувати криві залежностей $c\Phi(I)$, $M_{em}(I)$ і $\eta_{em}(I)$ при повному й ослабленому полі. Криві $M_{em}(I)$ побудувати на одному графіку з кривими $n(I)$ (див.рис. 2.14). Криві $c\Phi(I)$ і $\eta_{em}(I)$ побудувати на окремих графіках. На всіх графіках масштаб струму m , $мм/А$ вибрати однаковим.

5. Дослідити процес зміни струму й швидкості двигуна при ослабленні його магнітного потоку:

- Відповідно до п. 1 зробити пуск двигуна.

- При повному полі (вимикач $SF2$ відключений) установити струм якоря навантажувального генератора $I_2 > I_{2min}$ (дивитися показання амперметра $PA2$ « I_{G1} ») з таким розрахунком, щоб при ослабленні поля, що відповідає $\alpha_2 < I$ і $\alpha_3 < \alpha_2$, і зростанням частоти обертання якоря генератора, а отже, і зростанням ЕРС генератора можна було в сталому режимі ($n = const$) за допомогою збільшення опору реостата $R4$ « R » підтримати струм якоря генератора I_2 незмінним

$I_2 = \frac{E_2}{r_2 + R4}$, що відповідатиме з деяким наближенням незмінному значенню

моменту опору M_C на валу двигуна ($M_C = const$).

- Сталі значення струму навантаження двигуна I_{y1} , генератора I_2 і частоти обертання n_{y1} записати в таблицю 2.11.

- Точку з координатами $(I_{y1}; n_{y1})$ нанести на криву $n(I)$, що відповідає повному полю ($\alpha_1=1$) (точка I на рисунку 2.14). Даному сталому режимові відповідає електромагнітний момент двигуна M_{em1} (точка I' на рисунку 2.14).

Таблиця 2.11 – Значення струму, частоти обертання і електромагнітного моменту на початку і в кінці перехідного процесу, що виникає при ослабленні магнітного потоку

U, В	$\alpha_1=1$			$\alpha_2<1$				$\alpha_3<\alpha_2$			
	$I_2,$ А	$I_{y1},$ А	$n_{y1},$ об/хв	$I_{max2},$ А	$I_2,$ А	$I_{y2},$ А	$n_{y2},$ об/хв	$I_{max3},$ А	$I_2,$ А	$I_{y3},$ А	$n_{y3},$ об/хв

- Включити вимикач $SF2$ «Шунт OB » і поворотом рукоятки реостата $R3$ «Шунт» ослабити поле до значення $\alpha_2<1$.

- Виключити вимикач $SF2$ і при настанні сталого режиму, що відповідає $\alpha_1=1$, знову включити вимикач $SF2$ і за показанням амперметра $PA1$ « I_{m2} » зафіксувати максимальне значення струму якоря двигуна I_{max2} (кидок струму) при ослабленні поля (точка 2 на рисунку 2.14). Цьому струму на кривій $M_{em}(I)$ ($\alpha_2<\alpha_1$) відповідає значення моменту M_{emmax2} (точка 2'' на рисунку 2.14). Унаслідок збільшення моменту ($M_{emmax2}>M_{em}=M_C$) частота обертання двигуна буде зростати до сталого значення n_{y2} (точка 2' на рисунку 2.14), при якому $M_{em}=M_{em1}=M_C$. При цьому для збереження незмінного значення моменту опору на валу двигуна ($M_C=const$) необхідно в міру зростання частоти обертання збільшувати опір реостата $R4$ « R » з таким розрахунком, щоб струм генератора залишався незмінним ($I_2=const$). Сталому значенню частоти обертання n_{y2} відповідає стале значення струму якоря двигуна $I_{y2} > I_{y1}$ (рис. 2.14).

- Результати вимірів записати в таблицю 2.11.

- Аналогічно дослідити зміну струму, частоти обертання і моменту двигуна при ослабленні повного поля ($\alpha_1=1$) до значення, що відповідає $\alpha_3 < \alpha_2$.

- Результати вимірів записати в таблицю 2.11.

- Процес зміни струму, моменту і частоти обертання при ослабленні поля відобразити графічно, як це показано на рисунку 2.14. При цьому вважати, що в момент ослаблення поля частота обертання двигуна не встигає змінитися і залишається рівною n_{yI} ; момент опору M_C на валу двигуна підтримується постійним ($M_C = M_{emI} = const$). Процес зміни частоти обертання закінчується при досягненні рівності $M_{em} = M_C$.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема випробувань (рис. 2.13).
2. Таблиці 2.10 і 2.11 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули і приклад обчислення за кожною формулою.
3. Графік з кривими залежностей $n(I)$ і $M_{em}(I)$ (рис. 2.14). і відображенням процесу зміни струму, частоти обертання і моменту при ослабленні поля.
4. Графіки з кривими залежностей $c\Phi(I)$ і $\eta_{em}(I)$ при повному й ослабленому полі.
5. Висновки.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 4

1. Що таке коефіцієнт регулювання збудження? Яка його залежність від опору шунта $R_{ш}$ і опору обмотки збудження r_B ?
2. Чим визначається допустимий ступінь ослаблення магнітного потоку?
3. Як впливає ослаблення магнітного потоку на роботу тягового двигуна?
4. Пояснити сутність фізичних процесів, що відбуваються в тяговому двигуні при ослабленні магнітного потоку.
5. Який вплив ослаблення магнітного потоку на ККД тягового двигуна послідовного збудження?

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОСТАТНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

МЕТА РОБОТИ: придбати навички дослідного дослідження реостатного гальмування двигуна послідовного збудження шляхом зняття даних, розрахунку, побудови й аналізу характеристик швидкості і гальмової діаграми; одержати експериментальне підтвердження теоретичним зведенням про реостатне гальмування двигунів послідовного збудження.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зняти швидкісну характеристику двигуна при заданій напрузі мережі, розрахувати і побудувати криву залежності $C_e\Phi(I)$.
3. Розрахувати і побудувати характеристики швидкості $n(I_T)$ у режимі реостатного гальмування двигуна для трьох значень гальмового опору R_T .
4. Розрахувати і побудувати східчасту діаграму реостатного гальмування двигуна при заданих значеннях $I_{T\max}$ і коефіцієнта нерівномірності гальмування за струмом K_I . Встановити значення ступенів гальмового реостата.
5. Зняти дані і побудувати характеристики швидкості $n(I_T)$ у режимі реостатного гальмування для трьох значень гальмового опору R_T .
6. Зняти дані і побудувати криві $n(t)$ при реостатному гальмуванні для трьох значень гальмового опору R_T .
7. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

Реостатне гальмування відноситься до електричного виду гальмування, сутність якого полягає в тому, що двигун переходить у генераторний режим, унаслідок чого на якорі двигуна утвориться електромагнітний момент, спрямований проти обертання якоря, тобто гальмовий момент.

При тяговому режимі $U=E+rI$, тобто $U>E$, ЕРС E і струм I мають протилежний напрямок (рис. 2.15). При реостатному гальмуванні тяговий двигун відключається від мережі і працює генератором на гальмовий реостат. Механічна енергія руху транспортного засобу перетвориться в електричну, що витрачається на нагрівання гальмового реостата. При цьому, напрямки обертання якоря і магнітного потоку залишаються незмінними, ЕРС $E=C_e n \Phi = I_T (r + R_T)$ зберігає свій напрямок, а обумовлений нею гальмовий струм I_T спрямований протилежно струму I при тяговому режимі.

При реостатному гальмуванні двигуна послідовного збудження, як правило, використовується самозбудження, що відбувається завдяки потоку залишкового магнетизму, Φ_0 що зберігається в двигуні, і відповідної цьому потоку початкової (залишкової) ЕРС $E_0 = C_e n_T \Phi_0$. Якщо після тягового режиму відбувається переключення на режим реостатного гальмування без зміни схеми тягового режиму, то виникаючий під дією ЕРС E_0 у гальмовому контурі струм I_T матиме в обмотці збудження напрямок, зворотний (протилежний) струму I тягового режиму. При цьому напрямку струму двигун розмагнічується (потік Φ_0 зменшується), струм I_T і гальмова сила B будуть мізерно малі, тобто гальмового ефекту не буде. Для самозбудження двигуна в генераторному режимі необхідно в обмотці збудження зберегти напрямок струму тягового режиму. Цього можна досягти за допомогою переключення кінців обмотки збудження (рис. 2.15).

Процес самозбудження відбувається так (рис. 2.16). Після відключення двигуна від мережі і збирання ланцюга реостатного гальмування, що виникає в цьому ланцюзі, струм I_T створює МДС збудження, у результаті збільшиться магнітний потік і ЕРС якоря $E = C_e n_T \Phi$ (завдяки великій інерції транспортного

засобу швидкість його не встигає істотно змінитися за час електричних перехідних процесів), а отже, і струм I_T .

Цей процес зростання магнітного потоку Φ , ЕРС E і струму I_T при $R_T = const$ і $n_T = const$ – процес самозбудження – відбувається по кривій 1 залежності до настання в точці а сталого режиму, при якому ЕРС E двигуна дорівнює падінню напруги $I_T(r + R_T)$ у гальмовому ланцюзі (лінія 2), а ЕРС самоіндукції $\frac{LdI}{dt} = E - I_T(r + R_T) = 0$ (тут L – індуктивність ланцюга реостатного гальмування).

Тік I_T при цьому стає рівним сталому значенню I_y .

Електрична рівновага в точці а (рис. 2.16) є стійкою, тому що в цій точці $\frac{dE}{dI} < (r + R_T)$, тобто ЕРС $E = C_e n_T \Phi$ зростає зі збільшенням струму в меншій мірі, ніж сума спадань напруги $I(r + R_T)$.

При даній швидкості n_T положення точки «а» залежить від нахилу лінії $I(r + R_T)$, який тим більше, чим більше опір R_T . Отже, зі збільшенням цього опору точка «а» переміщується вліво, тобто зменшується сталий струм I_y реостатного гальмування.

Зі сказаного можна зробити висновок про те, що для самозбудження генератора необхідно виконати три умови:

- 1) у машині повинен бути потік залишкового магнетизму;
- 2) потік, створюваний струмом збудження, повинен підмагнічувати генератор, тобто збігатися за напрямком з потоком залишкового магнетизму;
- 3) опір R_T при даній частоті обертання $n_T = const$ повинен бути менше критичного значення, при якому генератор практично не збуджується (ЕРС і струм малі).

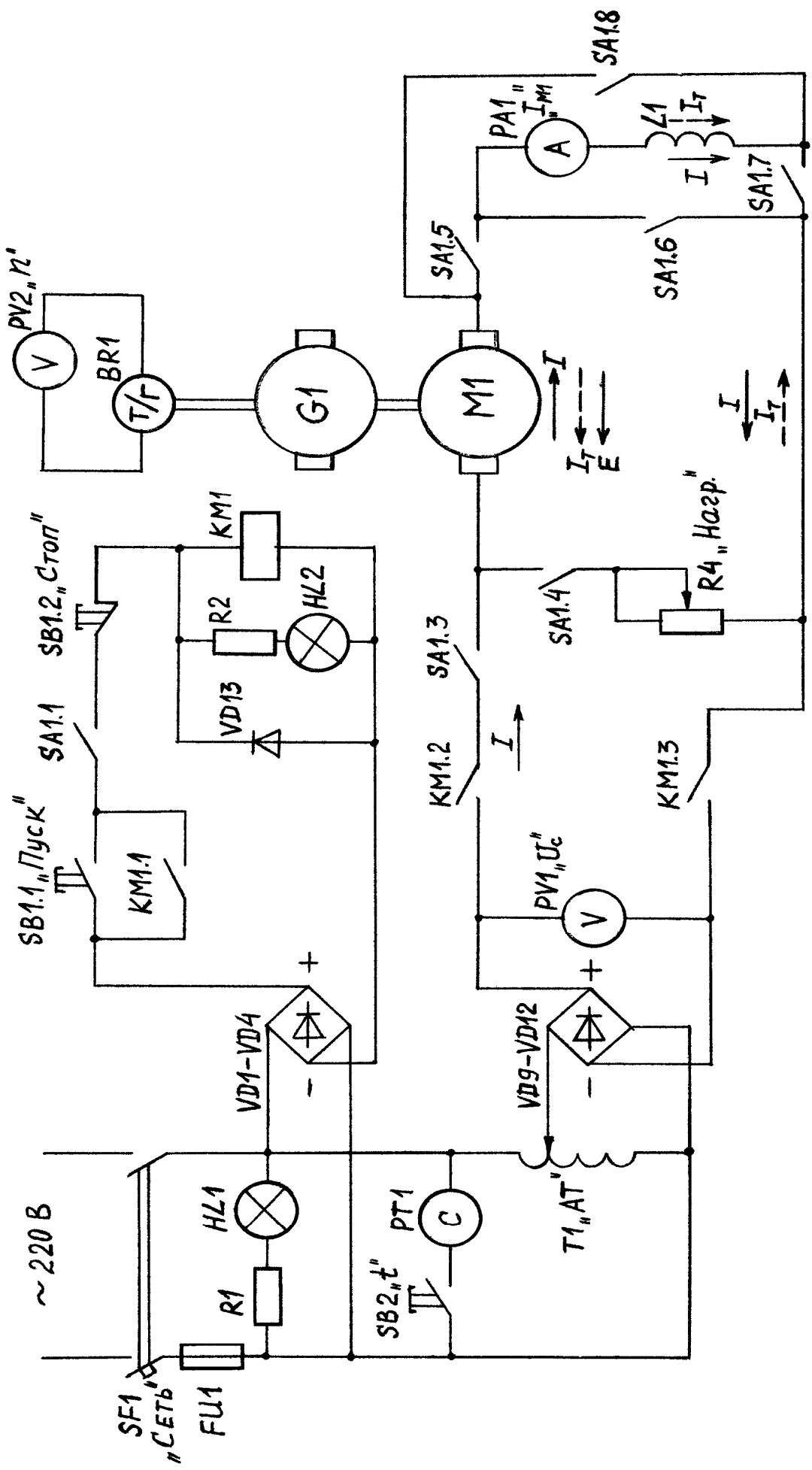


Рисунок 2.15 – Схема для дослідження реостатного гальмування двигуна послідовного збудження

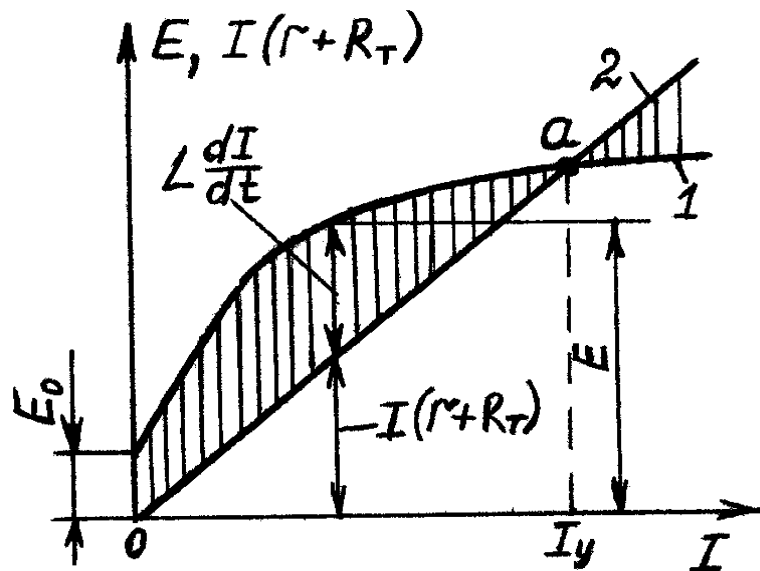


Рисунок 2.16 – Самозбудження генератора послідовного збудження

При самозбудженні характеристику швидкості $n(I_T)$ сталого режиму реостатного гальмування можна розрахувати, виходячи із заданого опору R_T гальмового реостата і відомої залежності $C_e\Phi(I)$ за формулою $n = \frac{(r+R_T)I_T}{C_e\Phi}$. Якщо залежність $C_e\Phi(I)$ не задана, характеристику $n(I_T)$ можна побудувати, користуючись залежністю $n_d(I)$ для двигуна з урахуванням того, що $C_e\Phi = \frac{U - rI}{n_d}$, де n_d – швидкість тягового режиму, що відповідає напрузі U і струму $I=I_T$, для якого визначається швидкість при реостатному гальмуванні.

У випадку застосування реостатного гальмування для зупинки поїзда бажано підтримувати гальмову силу, а отже, і гальмовий струм незмінними протягом усього періоду гальмування. При двигуні послідовного збудження для цього необхідно зменшити гальмовий опір пропорційно зниженню швидкості відповідно до формули:

$$R_T = n \frac{C_e\Phi}{I} - r.$$

Як у режимі реостатного пуску, гальмовий опір виводиться не плавно, а окремими ступенями (див. рис. 2.17). При виборі ступенів гальмового реостата також задаються межамі коливань гальмового струму $I_{T\max}$ до $I_{T\min}$. Межі

коливань струму і середній гальмовий струм I_T вибирають, виходячи з тих же міркувань, що і межі пускових струмів, але з урахуванням додаткового обмеження за максимально припустимою напругою $U_{\max} = R_T I_{T\max}$. Інтенсивність гальмування обмежена на високих швидкостях допустимою напругою, а потім максимально припустимим струмом двигуна. У міру зниження швидкості поступово виводяться окремі ступені реостата, завдяки чому підтримується приблизно незмінний середній гальмовий струм I_T . Після виведення останньої ступені реостата в процесі подальшого зниження швидкості гальмовий струм і гальмова сила різко зменшуються. При дуже малій швидкості, навіть якщо повністю виведений реостат, практично зникає ЕРС двигуна, а разом з нею гальмовий струм і гальмова сила.

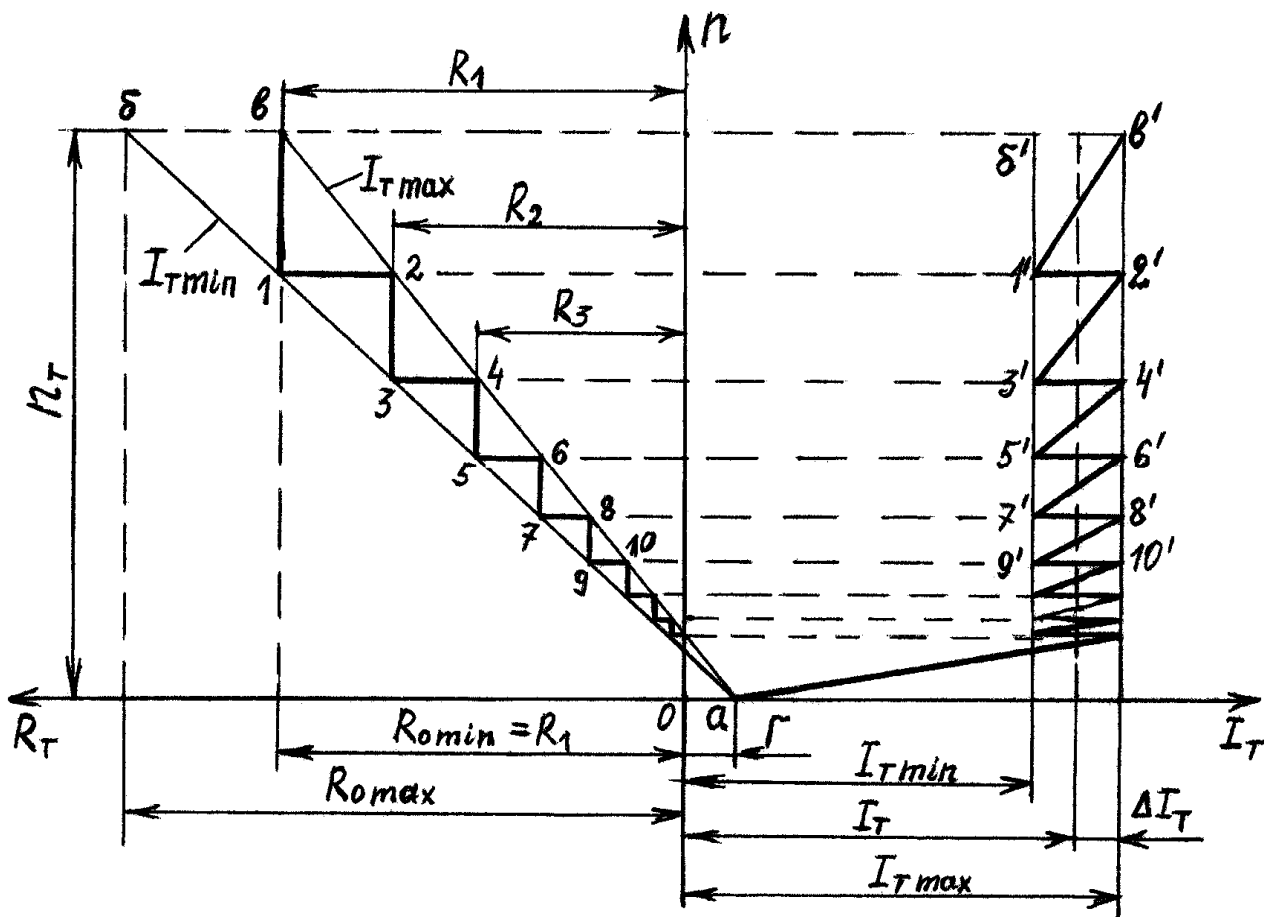


Рисунок 2.17 – Східчата діаграма реостатного гальмування двигуна послідовного збудження

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зняти швидкісну характеристику $n_D(I)$ двигуна при заданій напрузі мережі, розрахувати і побудувати криву залежності $C_e\Phi(I)$:

- Установити фальш-вилку №2 у штепсельне гніздо X2 (встановлено праворуч на бічній поверхні горизонтальної панелі пульта керування).

- Зробити пуск двигуна і зняти швидкісну характеристику $n_D(I)$ двигуна при заданій напрузі мережі

- Експериментальні дані записати в таблицю 2.12.

Таблиця 2.12 – Дані для побудови характеристик $C_e\Phi(I)$ і $n(I_T)$

№ п/п	Експериментальні дані			Розрахункові дані			
	U, В	I, А	n_D , об/хв	$C_e\Phi$, $\frac{В}{\text{об/хв}}$	n, об/хв		
					$R_{T1}=\dots$ Ом	$R_{T2}=\dots$ Ом	$R_{T3}=\dots$ Ом

- Величину $C_e\Phi$, $\frac{В}{\text{об/хв}}$ визначити за експериментальними даними

швидкісної характеристики $n_D(I)$ за формулою:

$$C_e\Phi = \frac{U - rI}{n_D},$$

де U – напруга на затисках двигуна, $В$, при якій знімалася швидкісна характеристика $n_D(I)$;

r – опір ланцюга двигуна, Ом (задається викладачем).

- Розрахункові значення $C_e\Phi$ записати в таблицю 2.12 і за ними побудувати криву залежності $C_e\Phi(I)$.

2. Розрахувати й побудувати характеристики швидкості $n(I_T)$ у режимі реостатного гальмування двигуна для трьох значень гальмового опору R_T .

Розрахунок характеристик виконати за формулою:

$$n = \frac{(r + R_T)I_T}{C_e\Phi}.$$

Значення гальмового струму I_T і відповідні цим значенням струму величини $C_e\Phi$ взяти з таблицю 2.12, значення гальмового опору R_T задаються викладачем.

Розрахункові значення швидкості n , об/хв, записати в таблицю 2.12 і за ними побудувати на одному графіку три криві залежності $n(I_T)$, що відповідають трьом значенням, R_{T1} , R_{T2} і R_{T3} гальмового опору R_T .

3. Розрахувати й побудувати східчасту діаграму реостатного гальмування двигуна при заданих значеннях I_{Tmax} і K_I . З діаграми визначити значення ступенів гальмового реостата.

Діаграму (рис. 2.17) побудувати в обраних масштабах частоти обертання $m_n \frac{мм}{об/хв}$, струму $m_I, мм/А$ і опору $m_R, мм/Ом$.

Розрахунки і побудову діаграми провести в наступному порядку. За заданими I_{Tmax} і K_I знайти значення середнього I_T і мінімального I_{Tmin} гальмового струму за формулами:

$$I_T = \frac{I_{Tmax}}{1 + K_I}; \quad I_{Tmin} = (1 - K_I)I_T.$$

На діаграмі праворуч провести вертикальні прямі, що відповідають гальмуванню при постійних значеннях струму I_{Tmin} і I_{Tmax} .

Розрахувати частоту обертання n_T , що відповідає початку гальмування, за формулою:

$$n_T = \frac{U_{max} + rI_T}{C_e\Phi}$$

Значення максимально припустимої напруги U_{max} задається викладачем; значення $C_e\Phi$, що відповідає середньому струму I_T , визначається з кривої $C_e\Phi(I)$.

Знаходимо початкові значення опору гальмового реостата за формулами

$$R_{0\min} = \frac{C_e \Phi n_T}{I_{T\max}} - r; \quad R_{0\max} = \frac{C_e \Phi n_T}{I_{T\min}} - r.$$

Значення $C_e \Phi$, що відповідають струмам $I_{T\max}$ і $I_{T\min}$, знаходимо з кривої $C_e \Phi(I)$.

На діаграмі ліворуч провести прямі ab і av залежності $R_T(n)$ відповідні струмам $I_{T\min}$ і $I_{T\max}$. Координати точок такі: a ($-r; 0$); b ($R_{0\max}; n$); v ($R_{0\min}; n_T$).

Побудова ламаної лінії 1, 2, 3, ... усередині прямих ab і av , що дозволяє визначити величини ступенів гальмових опорів, виконати в наступному порядку. Із точки v проводять вертикальну лінію до перетину з прямою ab у точці 1, а з точки 1 – горизонтальну лінію до перетину з прямою av у точці 2, далі з точки 2 – наступну вертикальну лінію і т.д., як показано в лівій частині рис. 2.17. Відрізки між ламаною лінією і віссю ординат відповідають величинам опорів гальмового реостата за позиціями, а відрізки 1-2, 3-4 і т.д. – частинам гальмового опору, які треба виводити для одержання коливачь струму від $I_{T\min}$ і $I_{T\max}$.

Для побудови гальмової діаграми струму точки 1-2, 3-4 і т.д. з'єднують горизонтальними лініями з вертикальними прямими $I_{T\min}$ і $I_{T\max}$ у правій частині рисунка. За отриманими точками 1'-2', 3'-4' і т.д. будують гальмову діаграму струму. Лінії $v'-1'$, 2'-3' і т.д. являють собою відрізки реостатних характеристик при гальмових опорах відповідно $R_1=R_{0\min}$, R_2 і т.д.

4. Зняти дані і побудувати характеристики швидкості $n(I)$ у режимі реостатного гальмування для трьох значень R_{T1} , R_{T2} і R_{T3} гальмові опори R_T :

- При знеструмленому стенді вийняти зі штепсельного гнізда X2 фальш-вилку №2 і установити в нього фальш-вилку №5.

- Установити ручку регулятора Т1»АТ» у крайнє ліве положення ($U=0$), перемикач SA1 «Режим» – у положення «Хід», при цьому в схемі на рисунку 5.1 замкнуться контакти SA1.1, SA1.3, SA1.5 і SA1.7 і розімкнуться – SA1.4, SA1.6 і SA1.8.

- Зробити пуск двигуна, для цього включити автоматичний вимикач SF1 «Мережа» (при цьому загоряється сигнальна лампочка HL1, що сигналізує про

справність плавкого запобіжника $FU1$ і подачі напруги на пульт керування), натиснути на кнопку $SB1.1$ «Пуск» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $HL2$, що сигналізує про подачу напруги на схему двигуна) і плавно повертаючи ручку регулятора напруги $T1$ « AT » за годинниковою стрілкою, збільшити напругу на двигуні до значення, що забезпечує задану частоту обертання в сталому режимі.

- Значення напруги і частоти знаходять за показаннями вольтметрів відповідно $PV1$ « U_C » і $PV2$ « n ». У процесі розгону (пуску) двигуна за показанням амперметра $PA1$ « $IM1$ » необхідно стежити, щоб струм двигуна не перевищував $8A$.

- Поворотом ручки реостата $R4$ «*Навант.*» установити задане значення гальмового опору R_{T1} .

- Установити режим реостатного гальмування. Для цього ручку перемикача $SA1$ «*Режим*» поставити в положення «*Гальмування*», у результаті чого двигун відключається від мережі (розмикаються контакти $SA1.1$ і $SA1.3$) і в ланцюг якоря двигуна вводиться гальмовий опір $RT1$ (розмикаються контакти $SA1.5$ і $SA1.7$ і замикаються контакти $SA1.4$, $SA1.6$ і $SA1.8$). При цьому струм у послідовній обмотці збудження зберігає напрямок рухового режиму, двигун самозбуджується і переходить у генераторний режим.

- У момент установки ручки перемикача $SA1$ «*Режим*» в положення «*Гальмування*» записати показання амперметра $PA1$ « $IM1$ » і вольтметра $PV2$ « n ». Надалі робити запис показань амперметра і вольтметра через $150-200$ об/хв. Отримані експериментальні дані занести в таблицю 2.13. Аналогічні виміри провести при значеннях гальмового опору R_{T2} і R_{T3} .

- За даними таблиці 2.13 побудувати криві залежності $n(I)$.

Таблиця 2.13 – Дані для побудови гальмових характеристик $n(I)$

№ п/п	$R_{T1}=\dots$ Ом		$R_{T2}=\dots$ Ом		$R_{T3}=\dots$ Ом	
	n , об/хв	I , А	n , об/хв	I , А	n , об/хв	I , А

5. Зняти дані і побудувати криві $n(t)$ при реостатному гальмуванні для трьох значень R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} гальмові опори R_T . Пуск двигуна і його гальмування проводити відповідно до методики, викладеної в п. 4. Швидкість початку гальмування n_T , задається викладачем. Час вимірювати секундоміром $PT1$, який слід включати в момент переходу двигуна в режим гальмування натисканням на кнопку $SB2$ « t ». У процесі гальмування робити запис показань секундоміра і вольтметра $PV2$ « n » через 180-200 об/хв. Отримані експериментальні дані занести в таблицю 2.14, за даними якої побудувати криві $n(t)$.

Таблиця 2.14 – Дані для побудови характеристик $n(I)$

№ п/п	$R_{T1}=\dots$ Ом			$R_{T2}=\dots$ Ом			$R_{T3}=\dots$ Ом		
	n , об/хв	t , с	a_T , рад/с ²	n , об/хв	t , с	a_T , рад/с ²	n , об/хв	t , с	a_T , рад/с ²
1	$n_T=700$			$n_T=700$			$n_T=700$		
2	600			600			600		
3	400			400			400		
4	200			200			200		
5	0			0			0		

Для всіх значень гальмового опору R_{T1} , R_{T2} і R_{T3} розрахувати середнє уповільнення a_T , рад/с² за формулою
$$a_T = \frac{\omega_T}{t_T} = \frac{\pi \cdot n_T}{30t_T},$$

де ω_T – кутова швидкість обертання якоря двигуна в момент переходу в режим гальмування, рад/с; t_T – час гальмування, с.

Розрахункові значення уповільнення записати в таблицю 2.14.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема випробувань (рис. 2.15).
2. Табл. 2.12-2.14 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули і приклади обчислення за кожною формулою.
3. Крива залежності $C_e\Phi(I)$; розрахункові й експериментальні характеристики швидкості $n(I_T)$, побудовані на одному графіку; криві залежності $n(t)$; східчаста діаграма реостатного гальмування (рис. 2.17).
4. Короткі пояснення й оцінка отриманих результатів.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №5

1. Сутність реостатного гальмування.
2. Поясніть процес самозбудження двигуна в режимі реостатного гальмування.
3. Яка умова електричної стійкості реостатного гальмування двигуна послідовного збудження?
4. Вплив величини гальмового опору і швидкості на процес самозбудження двигуна.
5. Яким чином можна прискорити процес самозбудження двигуна?
6. Переваги і недоліки реостатного гальмування при двигунах із самозбудженням.
7. Вплив величини гальмового опору на уповільнення.
8. Вплив величини гальмового опору на характеристики швидкості $n(I)$.
9. Методика розрахунку характеристик швидкості $n(I)$ реостатного гальмування.
10. Графічний розрахунок гальмових опорів.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

МЕТА РОБОТИ: придбати практичні навички дослідного дослідження режимів руху транспортного засобу шляхом зняття даних, побудови й аналізу кривих руху $n(t)$ на заданому перегоні при різних значеннях прискорення, уповільнення і швидкості початку гальмування; одержати експериментальне підтвердження теоретичним відомостям про вплив тягових і гальмових параметрів на режим руху транспортного засобу.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з випробувальним стендом і одержати допуск до роботи.
2. Зняти дані і побудувати:
 - а) криві $n(t)$ і $I(t)$ під час руху під струмом для двох заданих значень пускового прискорення a_{II} (напруги U);
 - б) криву $n(t)$ при русі без струму (вибігу);
 - в) криві $n(t)$ при гальмуванні для двох заданих значень уповільнення a_T .
3. Дослідити вплив пускового прискорення a_{II} на ходову швидкість v_X при незмінних значеннях швидкості початку гальмування ($v_T=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$).
4. Дослідити вплив пускового прискорення a_{II} на витрату електроенергії, а при незмінних значеннях ходової швидкості ($v_X=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$).
5. Дослідити вплив швидкості початку гальмування v_T на ходову швидкість v_X і витрату електроенергії, а при незмінних значеннях пускового прискорення ($a_{II}=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$).
6. Дослідити вплив гальмового уповільнення a_T на витрату електроенергії, а при незмінних значеннях ходової швидкості ($v_X=const$) і пускового прискорення ($a_{II}=const$).
7. Скласти звіт і захистити роботу.

Загальні відомості

Рух транспортного засобу описується диференціальними рівняннями, що дають залежності між швидкістю руху v , пройденою відстанню (шляхом) l і часом t .

Характер руху транспортного засобу визначають залежності швидкості від часу $v(t)$ і від пройденого шляху $v(l)$. Графічне зображення цих залежностей називають кривими руху транспортного засобу.

Побудову кривих $v(t)$ і $v(l)$ на заданому перегоні роблять шляхом сполучення кривих для основних режимів руху транспортного засобу – режиму тяги (руху під струмом), режиму вибігу (руху без струму) і режиму гальмування – за заданим значенням швидкості початку гальмування v_T , швидкості початку вибігу v_B , або ходової швидкості v_X .

На основі аналізу кривих руху проводять вибір найбільш раціонального (найвигіднішого) режиму руху (ведення) транспортного засобу, що визначає найважливіші показники роботи міського електротранспорту – швидкість і витрату електроенергії.

Від режиму руху транспортного засобу – прискорення, уповільнення, швидкості в момент початку гальмування – залежать втрати в гальмах при зупинках і в пускових реостатах. Ці втрати відіграють значну роль на міському електротранспорті при коротких відстанях між зупинками.

Підвищення пускового прискорення до визначених меж при заданій довжині перегону приводить до зменшення втрат у пускових реостатах за рахунок зниження пускової швидкості v_{II} і зменшення пускового шляху l_{II} , а також до зменшення втрат у гальмах при зупинці поїзда за рахунок зниження швидкості v_T в момент початку гальмування.

Збільшення гальмового уповільнення a_T при даній ходовій швидкості на перегоні також знижує витрату енергії, але не настільки значно, як збільшення пускового прискорення a_{II} .

Великий вплив на витрату енергії робить швидкість v_T у момент початку гальмування. З ростом цієї швидкості загальний час руху на перегоні зменшується, збільшується ходова швидкість і підвищується витрата електроенергії за рахунок зростання втрат у гальмах.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зняти дані й побудувати криві $n(t)$ і $I(t)$ при русі під струмом для двох значень пускового прискорення a_{II} (напруги U):

- Установити фальш-вилку №6 у штепсельне гніздо $X2$ (установлено праворуч на бічній поверхні горизонтальної панелі пульта керування) відповідно до рисунку 2.18.

- Установити перемикач $SA1$ «Режим» у положення «Хід», ручку регулятора напруги $T1$ «АТ» у крайнє ліве положення ($U=0$), ручку реостата навантаження $R4$ «R» повернути вліво до упора ($R=R_{\max}$).

- Включити автоматичний вимикач $SF1$ «Мережа» (загоряється сигнальна лампочка $HL1$, що сигналізує про справність плавкого запобіжника $FU1$ і про подачу напруги на пульт керування), натиснути на кнопку $SB1.1$ «Пуск» (при цьому загоряється сигнальна лампочка $HL2$, що сигналізує про подачу напруги на схему двигуна) і, плавно повертаючи ручку регулятора напруги $T1$ «АТ» за годинниковою стрілкою, зробити пуск двигуна до заданого значення частоти обертання (дивитися показання вольтметра $PV2$ «n»). При цьому за показанням амперметра $PA1$ « I_{M1} » необхідно стежити, щоб струм двигуна при пуску не перевищував δA .

- За показанням вольтметра $PV1$ « U_C » зафіксувати значення напруги U_1 на затискачах двигуна і записати в таблицю 2.15.

- Натисканням на кнопку $SB1.2$ «Зупинка» зупинити двигун.

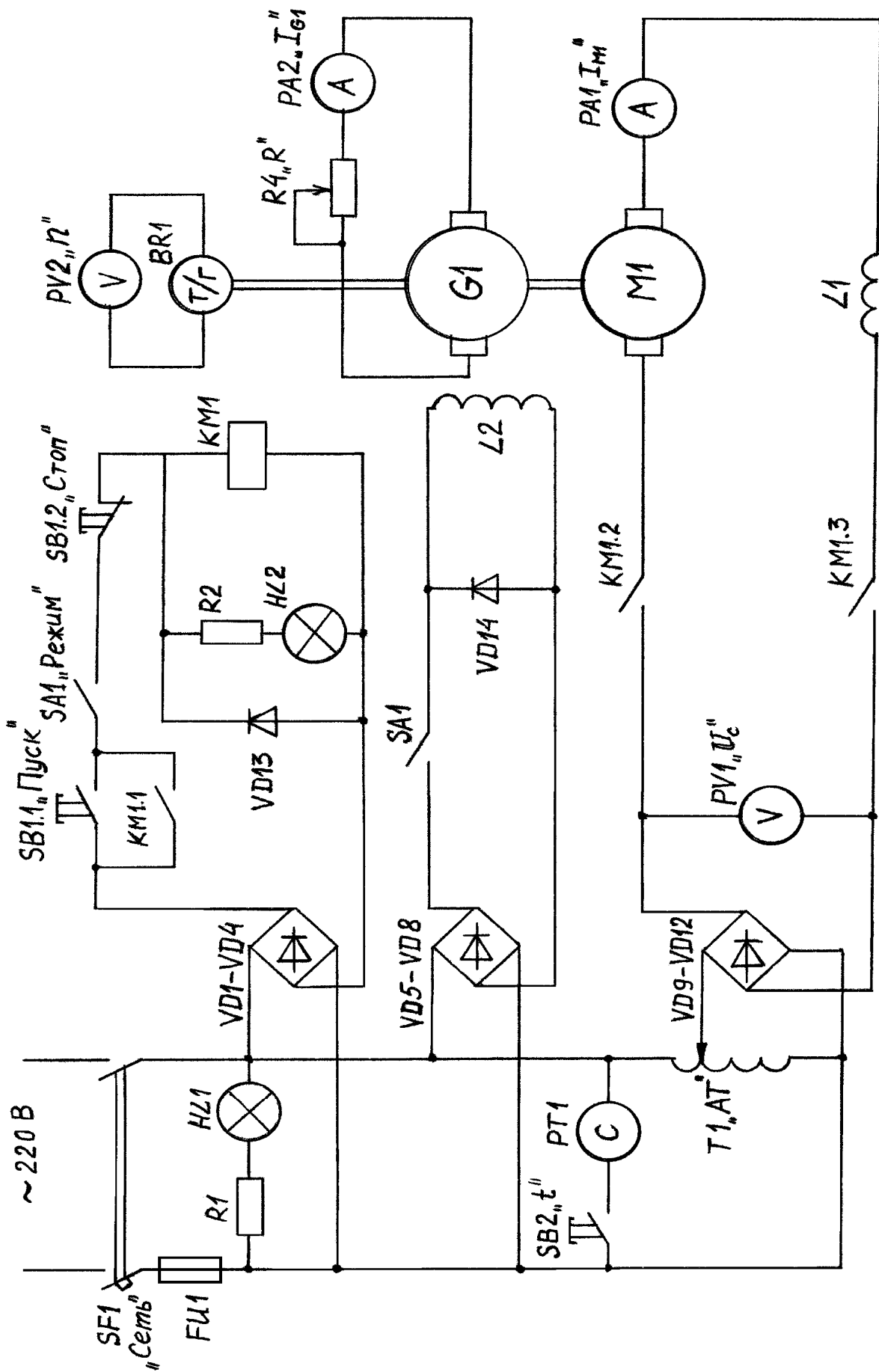


Рисунок 2.18 – Схема для дослідження режимів руху потяга

- Одночасним натисканням на кнопки *SB1.1* «Пуск» і *SB2* «*t*» ввімкнути двигун і секундомір *PT1*.

- В міру розгону двигуна знімати (через 150-200 об/хв) показання вольметра *PV2* «*n*», амперметра *PA1* «*I_{M1}*» і секундоміра *PT1* (значення початкового пускового струму зафіксувати в момент пуску, тобто при $n=0, t=0$).

- Останній вимір зробити при досягненні двигуном заданої частоти обертання або при настанні сталого режиму. Дані вимірів записати в таблицю 2.15.

- Дослід повторити при іншому заданому значенні напруги $U_2 < U_1$. Дані вимірів записати в таблицю 2.18. За даними таблиці побудувати криві $n(t)$ (рис. 2.19, криві 1, 2) і $I(t)$ (рис. 2.20).

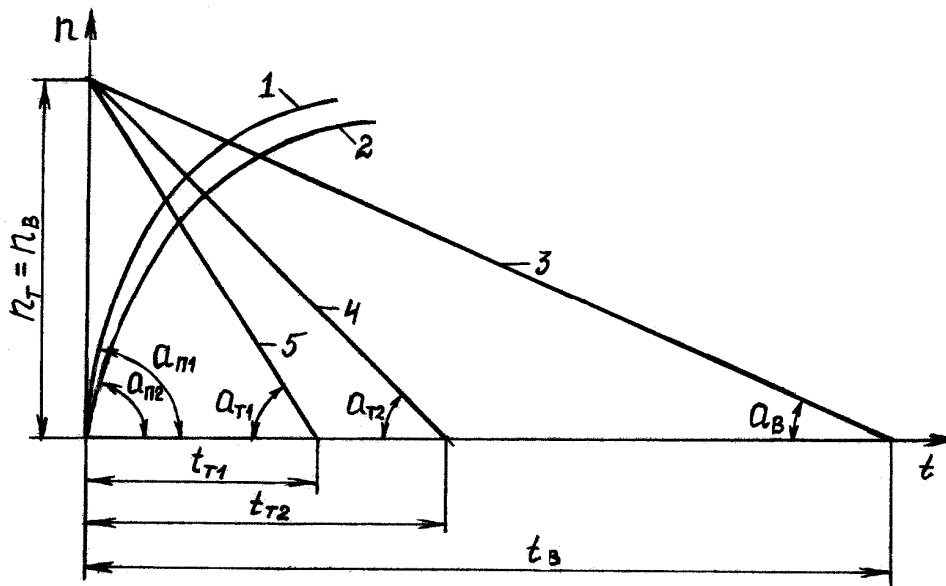


Рисунок 2.19 – Криві руху $n(t)$: 1;2 – в режимі тяги при U_1 і $U_2 < U_1$;

3 – в режимі вибігу; 4;5 – в режимі гальмування при a_{T1} і $a_{T2} < a_{T1}$

2. Зняти дані і побудувати криву $n(t)$ при русі без струму (вибігу):

- Відповідно до *n.1* зробити пуск двигуна до заданого значення частоти обертання. Значення частоти записати в таблицю 2.16.

- Установити режим вибігу. Для цього ручку перемикача *SA1* «Режим» установити в положення «Вибіг», у результаті чого двигун відключиться від мережі (розмикається ланцюг живлення котушки контактора *KM1*, що своїми

контактами *KM1.2* і *KM1.3* відключить двигун від мережі) і з нього буде зняте навантаження, тому що розмикається ланцюг живлення обмотки збудження *L2* навантажувального генератора *G1* (рис. 2.18). Одночасно з переходом двигуна в режим вибігу необхідно натиснути на кнопку *SB2 «t»* і включити секундомір *PT1*. Із зниженням частоти обертання двигуна (через 150-200 об/хв) знімати показання вольметра *PV2 «n»* і секундоміри *PT1*.

- Останній вимір зробити при $n=0$. Дані вимірів записати в таблицю 2.15 і побудувати криву $n(t)$ у режимі вибігу (рис. 2.19, крива 3).

Значення середнього уповільнення при вибігу a_B , рад/с^2 розрахувати за формулою

$$a_B = \frac{\omega_B}{t_B} = \frac{\pi \cdot n_B}{30t_B},$$

де ω_B – кутова швидкість обертання якоря двигуна в момент початку вибігу, рад/с ; n_B – частота обертання якоря двигуна в момент початку вибігу, об/хв ; t_B – час вибігу, с .

Таблиця 2.15 – Дані для побудови кривих $n(t)$ і $I(t)$ при русі під струмом

№ п/п	$U_1 = \dots B$			$U_2 = \dots B$		
	n , об/хв.	I , А	t , с	n , об/хв	I , А	t , с
1	0	$I_1 = I_{max}$	$t_1 = 0$			
2	200	I_2	t_2			
3	400	I_3	t_3			
...			
...			
...			
n	n_{max}	I_{min}	t_{max}			

Таблиця 2.16 – Дані для побудови кривої $n(t)$ при вибігу

№ п/п	n , об/хв	t , с	a_B , рад/с ²
1	$n_1=n_B$	$t_1=0$	
2	n_2	t_2	
...	
...	0	t_B	

3. Зняти дані й побудувати криві $n(t)$ у режимі гальмування для двох заданих значень уповільнення a_T :

- Установити ручку перемикача $SA1$ «Режим» у положення «Хід» і відповідно до n_1 зробити пуск двигуна до заданого значення частоти обертання. Значення частоти записати в таблицю 2.17.

- Установити режим гальмування. Для цього ручку перемикача $SA1$ «Режим» установити в положення «Гальмування», у результаті двигун відключиться від мережі і буде гальмуватися навантажувальним генератором GI . Одночасно з переходом двигуна в режим гальмування необхідно натиснути на кнопку $SB2$ « t » і включити секундомір $PT1$. Із зниженням частоти обертання двигуна (через 150-200 об/хв) знімати показання вольтметра $PV2$ « n » і секундоміра $PT1$. Останній вимір зробити при $n=0$. Дані вимірів записати в таблицю 2.17.

Таблиця 2.17 – Дані для побудови кривих $n(t)$ при гальмуванні

№ п/п	$a_{T2} = a_{T_{\min}} (R4 = \max) = \dots \text{ рад/с}^2$		$a_{T1} = a_{T_{\max}} (R4 = \min) = \dots \text{ рад/с}^2$	
	n , об/хв	t , с	n , об/хв	t , с
1	$n_1=n_T$	0	$n_1=n_T$	0
2
...	0	t_{T1}	0	t_{T2}

- Установити ручку перемикача $SA1$ «Режим» у положення «Хід» і відповідно до n_1 зробити пуск двигуна до заданого значення частоти обертання. Ручку реостата навантаження $R4$ « R » плавно перевести з положення R_{\max} , при

якому був зроблений пуск двигуна, у положення R_{\min} або інше зазначене положення. При цьому за амперметром $PA1$ « I_{M1} » стежити, щоб струм навантаження двигуна не перевищив $8A$. У таблиці 2.17 записати значення частоти обертання.

- Установити режим гальмування. Для цього ручку перемикача $SA1$ «Режим» установити в положення «Гальмування» і одночасно натисканням на кнопку $SB2$ « t » включити секундомір $PT1$. Із зниженням частоти обертання двигуна (через $150-200$ об/хв) знімати показання вольтметра $PV2$ « n » і секундоміра $PT1$. Останній вимір зробити при $n=0$. Дані вимірів записати в таблицю 2.17.

За даними таблиці 6.3 побудувати криві $n(t)$, що відповідають двом значенням уповільнення: $a_{T2}=a_{T\min}$ і $a_{T1}=a_{T\max}$ (рис. 2.9, криві 4 і 5).

Значення середнього уповільнення a_T , $рад/с^2$ розрахувати за формулою:

$$a_T = \frac{\omega_T}{t_T} = \frac{\pi \cdot n_T}{30t_T},$$

де ω_T – кутова швидкість обертання якоря двигуна в момент початку гальмування, $рад/с$;

n_T – частота обертання якоря двигуна в момент початку гальмування, $об/хв$;

t_T – час гальмування, $с$.

4. Дослідити вплив пускового прискорення на ходову швидкість при незмінному значенні швидкості початку гальмування ($n=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$):

- Для проведення дослідження необхідно побудувати дві криві $n(t)$ (рис. 2.21) шляхом сполучення кривих $n(t)$ для різних режимів руху (рис. 6.19). Площі, обмежені кривими 1 і 2, однакові, тому що відповідають однаковому перегону. Тому заштриховані на рисунку 2.21 ділянки також повинні бути рівні.

З рисунку 2.21 видно, що чим більше пускове прискорення, тим менше ходовий час і більше ходова швидкість ($a_{П1} > a_{П2}$; $t_{X1} < t_{X2}$; $n_{ср1} > n_{ср2}$).

Середню частоту обертання $n_{сер}$ об/хв, пропорційна середній (ходовій) швидкості транспортного засобу v_X , розраховують за формулою:

$$n_{сер} = \frac{S}{t_X \cdot m_n \cdot m_t},$$

де S – площа, обмежена кривою руху $n(t)$, мм²;

m_n – масштаб частоти обертання, $\frac{мм}{об/хв}$;

m_t – масштаб часу, мм/с;

t_X – ходовий час (час руху по перегону), с.

За побудованими кривими руху $n(t)$ розрахувати значення середньої швидкості $n_{сер}$. Результати розрахунку записати в таблицю 2.18.

Таблиця 2.18 – Значення середньої швидкості при різних пускових прискореннях

a_T , рад/с ²	n_T , об/хв	U_1 , В	t_{X1} , с	$n_{сер1}$, об/хв	U_2 , В	t_{X2} , с	$n_{сер2}$, об/хв

5. Дослідити вплив пускового прискорення на витрату електроенергії при незмінному значенні ходової швидкості (ходового часу) і гальмового уповільнення.

Для проведення дослідження треба побудувати криві руху $n(t)$ при однакових значеннях ходової швидкості ($v=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$) і криві споживання струму $I(t)$ для двох різних пускових прискорень (напруг) (рис. 2.22). При цьому слід використовувати зняті експериментально криві $n(t)$ для трьох основних режимів руху (рис. 2.19) і криві $I(t)$ (рис. 6.20). Оскільки довжини перегонів і ходові (середні) швидкості однакові ($l=const$, $v=const$), то площі, обмежені кривими руху $n(t)$, пропорційні довжині перегону, повинні бути однакові (заштриховані на рис. 2.22 ділянки повинні бути рівні), загальний час ходу t_X в обох випадках також однаковий.

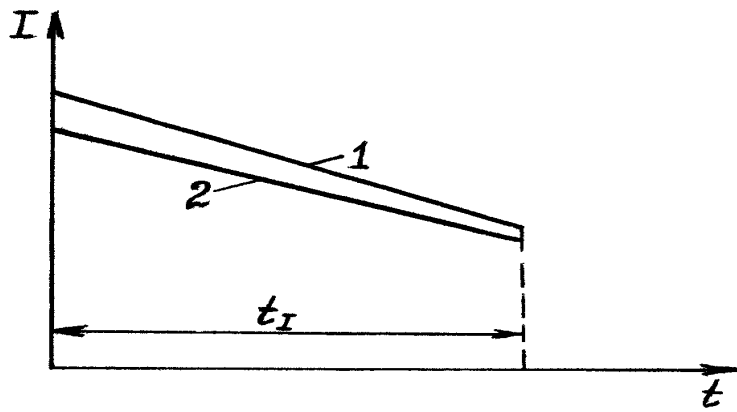


Рисунок 2.20 – Криві споживання двигуном струму:

1 – при напрузі U_1 ; 2 – при напрузі $U_2 < U_1$

Як видно з рисунку 2.22, при більшому прискоренні зменшується час їзди під струмом ($t_{11} < t_{12}$), а отже збільшується тривалість вибігу і зменшується швидкість початку гальмування ($n_{T1} < n_{T2}$). Тому при більш високому прискоренні зменшуються втрати в гальмах пропорційно квадрату швидкості початку гальмування. Крім того, економія енергії відбувається за рахунок зниження пускових втрат пропорційно корисній роботі, виконаній двигунами за період пуску. Ця корисна робота знижується через зменшення пускової швидкості v_{II} , а отже, і кінетичної енергії, а також через зменшення пускового шляху l_{II} , а отже, і роботи сил опору руху.

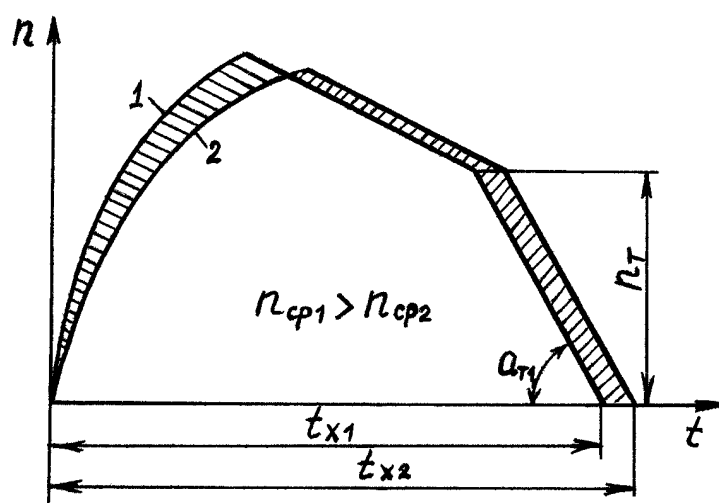


Рисунок 2.21 – Вплив пускового прискорення на рухову швидкість

при $n_T = const, a_T = const$

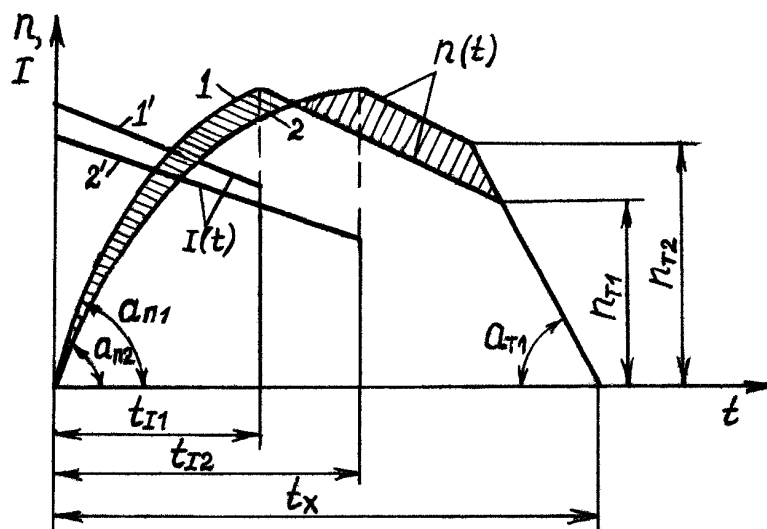


Рисунок 2.22 – Вплив пускового прискорення на витрату електроенергії при $a_T = \text{const}$, $v_X = \text{const}$: 1 – крива руху $n(t)$ при напрузі U_1 ; 2 – те ж саме при $U_2 < U_1$; 1'; 2' – криві споживання струму відповідно при U_1 і $U_2 < U_1$

Витрату електроенергії A , Дж визначають за формулою

$$A = U \cdot I_{cp} \cdot t_I = UQ,$$

де U – напруга, при якій знімалася крива $n(t)$ у режимі тяги, В;

$I_{cp} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$ – середнє значення струму за період тяги, А;

t_I – час руху під струмом (тяги), с;

Q – кількість електричества, спожитого за період тяги, Кл:

$$Q = I_{cp} \cdot t_I = \frac{S_I}{m_I m_t},$$

де S_I – площа, обмежена кривою $I(t)$ і осями координат, мм^2 ; m_I – масштаб струму, $\text{мм}/\text{А}$; m_t – масштаб часу, $\text{мм}/\text{с}$.

За побудованими кривими руху $n(t)$ розрахувати середню швидкість $n_{сер}$ і витрату електроенергії A . Результати розрахунку записати в таблицю 2.19.

Таблиця 2.19 – Витрата енергії при різних пускових прискореннях

$n_{сер}$, об/хв	a_T , рад/с ²	U_1 , В	n_{T1} , об/хв	A_1 , Дж	U_2 , В	n_{T2} , об/хв	A_2 , Дж

6. Дослідити вплив швидкості початку гальмування на ходову швидкість і витрату електроенергії при незмінних значеннях пускового прискорення, гальмового уповільнення і довжини перегону. Для проведення дослідження необхідно на тому самому перегоні ($l=const$) побудувати криву споживання струму $I(t)$ і декілька кривих руху $n(t)$ при різних значеннях швидкості в момент початку гальмування ($n=var$) і однакових значеннях пускового прискорення ($a_{II}=const$) і гальмового уповільнення ($a_T=const$) (див. рис. 2.23). При побудові кривих $n(t)$ треба виходити з умови рівності площ, обмежених кривими.

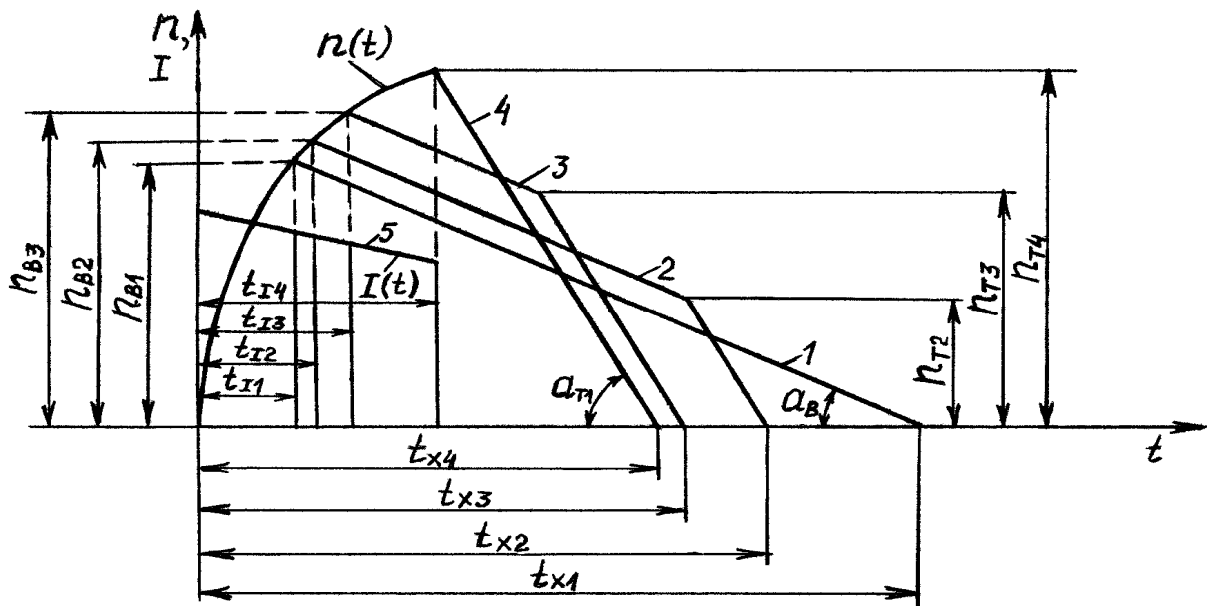


Рисунок 2.23 – Вплив швидкості початку гальмування n_T на рухову швидкість і витрату електроенергії: 1;2;3;4 – криві руху $n(t)$ при $a_{II}=const$, $a_T=const$ і $n_T=var$; 5 – крива споживання струму $I(t)$

На рисунку 2.23 крива 1 – режим руху без гальмування з вибігом до повної зупинки, криві 2 і 3 – з вибігом і гальмуванням ($n_{T2} < n_{T3}$), крива 4 – без вибігу з гальмуванням при $n_{T4} = n_{Tmax}$. Чим більше швидкість у момент початку гальмування ($n_{T4} > n_{T3} > n_{T2} > n_{T1} = 0$), тим менше ходовий час ($t_{x4} < t_{x3} < t_{x2} < t_{x1}$), більше ходова швидкість ($n_{сеп4} > n_{сеп3} > n_{сеп2} > n_{сеп1}$), більше час руху під струмом ($t_{I4} > t_{I3} > t_{I2} > t_{I1}$) і більше витрата електроенергії ($A_4 > A_3 > A_2 > A_1$). Кривій руху 1 відповідає мінімальний час їзди під струмом ($t_{I1} = t_{Imin}$), а кривій 4 – максимальний ($t_{I4} = t_{Imax}$).

Криві руху $n(t)$ на заданому перегоні будуються шляхом сполучення кривих $n(t)$, знятих експериментально для різних режимів руху (рис. 2.19). Крива споживання струму $I(t)$ (рис. 2.20) повинна відповідати тому значенню напруги U , при якому знімалася крива руху в режимі тяги, і яка була використана при побудові кривих руху на перегоні.

За побудованими кривими руху $n(t)$ розрахувати середні швидкості руху $n_{cp} = \frac{S}{t_x m_n m_t}$ і витрату електроенергії $A = UI_{сеп} t_I = UQ$. Результати розрахунку записати в таблицю 2.20. За даними таблиці побудувати криві залежностей $n_{сеп}(n_T)$ і $A(n_T)$ (рис. 2.24).

Таблиця 2.20 – Дані для побудови кривих $n_{сеп}(n_T)$ і $A(n_T)$.

№ о/о	$U, В$	$a_T,$ рад/с ²	$n,$ об/хв	$n_{сеп},$ об/хв	$A,$ Дж
1			$n_{T1}=0$		$A_1=A_{min}$
2			n_{T2}		A_2
3			n_{T3}		A_3
4			$n_{T4}=n_{Tmax}$		$A_4=A_{max}$

7. Дослідити вплив гальмового уповільнення a_T на витрату електроенергії A при незмінних значеннях ходової швидкості ($n_{сеп}=const$) і пускового прискорення ($a_{II}=const$).

Для проведення дослідження необхідно на тому самому перегоні ($l=const$) побудувати криву споживання струму $I(t)$ і дві криві руху $n(t)$ при різних значеннях гальмового уповільнення ($a_T=var$) і однакових значеннях пускового прискорення ($a_{II}=const$) і ходового часу ($t=const$), а отже, і ходової швидкості ($n_{сеп}=const$) (рис. 2.25). При побудові кривих $n(t)$ слід виходити з умови рівності площ, обмежених кривими (заштриховані на рисунку 2.25 ділянки повинні бути рівні).

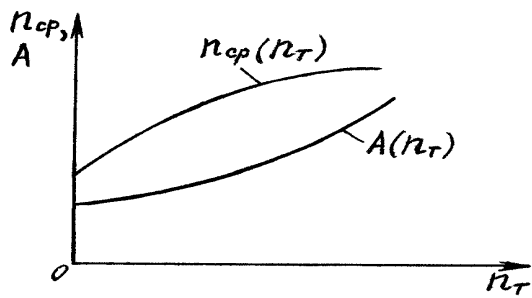


Рисунок 2.24 – Криві залежності $n_{cp}(n_T)$ і $A(n_T)$

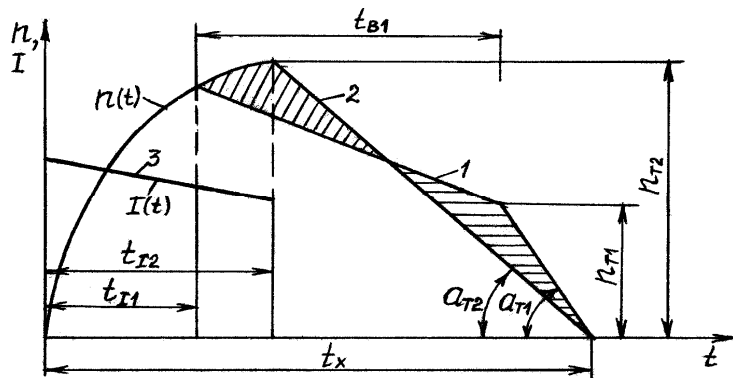


Рисунок 2.25 – Вплив гальмового уповільнення a_T на витрату електроенергії при $a_n=const, v_x=const (n_{cp}=const)$; 1; 2 – криві руху $n(t)$; 3 – крива споживання струму $I(t)$

На рисунку 2.25 крива 1 – режим руху з вибігом і гальмуванням при середньому уповільненні a_{T1} , крива 2 – режим руху без вибігу і гальмуванням при середньому уповільненні $a_{T2} < a_{T1}$. Як видно з рисунка, при постійній ходовій швидкості ($n_{cp}=const$) зі збільшенням гальмового уповільнення ($a_{T1} > a_{T2}$) зменшується час їзди під струмом ($t_{T1} < t_{T2}$), збільшується час вибігу ($t_{B1} > t_{B2} = 0$) і зменшується швидкість початку гальмування ($n_{T1} < n_{T2}$), а отже, знижуються втрати в гальмах і витрата електроенергії.

За побудованими кривими руху $n(t)$ розрахувати середню швидкість руху n_{cp} і витрату електроенергії A . Результати розрахунку записати таблицю 2.21.

Таблиця 2.21 – Витрата енергії при різних гальмових уповільненнях

U, В	n_{cp} , об/хв	a_{T1} , рад/с ²	n_{T1} , об/хв	A_1 , Дж	a_{T2} , рад/с ²	n_{T2} , об/хв	A_2 , Дж

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Електрична принципова схема для дослідження режимів руху транспортного засобу (рис. 2.18).
2. Таблиці 2.15 – 2.21 з результатами вимірів і обчислень, розрахункові формули і приклад обчислення за кожною формулою.
3. Графіки з кривими руху $n(t)$ і споживання струму $I(t)$ (рис. 2.19 – 2.25).
4. Висновки.

ЗАПИТАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 6

1. Вплив пускового прискорення на ходову (середню) швидкість руху транспортного засобу на перегоні.
2. Вплив пускового прискорення на витрату електроенергії.
3. Вплив швидкості початку гальмування на ходову (середню) швидкість і витрату електроенергії.
4. Вплив гальмового уповільнення на середню швидкість і витрату електроенергії.
5. Основні шляхи зниження витрати електроенергії на рух транспортного засобу міського електротранспорту.
6. Вплив швидкості руху транспортного засобу на витрату електроенергії.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт
із навчальних дисциплін

«ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

та

«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

Укладачі: **ЗАКУРДАЙ** Світлана Олександрівна,
КОСТЕНКО Іван Олександрович

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *С. О. Закурдай*

План 2020, поз. 132М

Підп. до друку 19.03.2020. Формат 60 × 84/16
Друк на ризографі. Ум. друк. арк.5,2
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.