

7. Lavasani, A. M. Flow around two cam shaped cylinders in tandem arrangement [Текст] / A. M. Lavasani, H. Bayat // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – №67. – P. 1286-1289.
8. Roach, P. E. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids [Текст] / P. E. Roach // J. Heat and Fluid Flow. – 1987. – V.8. – №2. – pp. 82-92.
9. Жукаускас, А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости [Текст] / А. Жукаускас, И. Жюгжда. – Вильнюс Мокслас, 1979. – 240 с.
10. Дыбан, Е. П. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков [Текст] / Е. П. Дыбан, Э. Я. Эпик – Киев: Наукова думка, 1985. – 296 с.
11. Жукова, Ю. В. Средняя теплоотдача одиночного овалообразного цилиндра [Текст] / Ю. В. Жукова, А. М. Терех, С. А. Исаев, Е. Н. Письменный // тез. докл. XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях. 23-27 мая 2011 г., г. Звенигород, Россия – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – С.61-62.
12. Письменный, Е. Н. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоскоовальных труб [Текст] / Е. Н. Письменный, В. А. Кондратюк, Ю. В. Жукова, А. М. Терех // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2/8 (50). – С. 4-8.
13. Дыбан, Е. П. Теплообмен цилиндра конечной длины [Текст] / Е. П. Дыбан, Л. Е. Юшина // Промышленная тепло-техника. – 1982. – Т. 4. – №5. – С.3-8.

Розглянуті питання підвищення енергетичної ефективності роботи пристроїв регулювання швидкості тягових електричних двигунів рухомого складу міського електричного транспорту. Запропонована модернізована схема ослаблення поля з використанням DC-DC перетворювача для тягових двигунів змішаного збудження. Приведено принципову електричну схему випробувального стенду та результати досліджень запропонованого способу ослаблення поля

Ключові слова: ослаблення поля, DC-DC перетворювач, електрорухоми́й склад, потужність, регулювання, швидкість, транспорт

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности работы устройств регулирования скорости тяговых двигателей подвижного состава городского электрического транспорта. Предложена модернизированная схема ослабления поля с использованием DC-DC преобразователя для тяговых электродвигателей смешанного возбуждения. Приведены принципиальная электрическая схема испытательного стенда и результаты исследований предложенного способа ослабления поля

Ключевые слова: ослабление поля, DC-DC преобразователь, электроподвижной состав, мощность, регулирование, скорость, транспорт

УДК 629.421

ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮ-ВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В. П. Андрійченко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

С. О. Закурдай

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: lanazakurday@yandex.ru

І. О. Костенко

Асистент*

E-mail: ks170685@ukr.net

*Кафедра електричного транспорту

Харківський національний університет

міського господарства

ім. О. М. Бекетова

вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

1. Вступ

Процес пуску рухомого складу міського електричного транспорту з тяговими електричними двигунами (ТЕД) постійного струму можна розділити на дві стадії: першу, при якій змінюється напруга на якорі тягового двигуна, і другу, коли регулюється

його магнітний потік. Причому більшу частину часу при пуску тягові двигуни працюють при ослабленому полі (ОП). Найбільш поширеним способом ОП являється використання активних опорів, що призводить до додаткових витрат енергії та зниженому ККД рухомого складу. В теперішній час актуальним є створення ефективних енергозберігаючих

способів ОП для рухомого складу міського електричного транспорту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Регулювання швидкості рухомого складу з ТЕД постійного струму за рахунок зменшення магнітного потоку можна виконувати одним з наступних способів:

- відключенням частини витків обмотки послідовного збудження [1, 2];
- паралельним приєднанням до обмотки послідовного збудження активних опорів [3, 4];
- регулюванням величини струмів обмотці паралельного збудження (у ТЕД змішаного збудження) [5];
- комбінацією другого та третього способів [6];
- регулюванням струму за допомогою спеціального збуджувача [7];
- імпульсним регулюванням струму збудження (при використанні тиристорних або транзисторних перетворювачів) [8].

Ступінь ослаблення поля можна оцінити коефіцієнтом регулювання збудження при визначених величинах намагнічуючої сили ТЕД:

$$\alpha = \frac{F_{оп}}{F_{пн}} \tag{1}$$

де $F_{оп}, F_{пн}$ – намагнічуючі сили на ослабленому і повному полі.

Коефіцієнт α теоретично може змінюватись в діапазоні від 0 до 1 і вимірюється як у відсотках, так і у відносних одиницях. Відношення намагнічуючих сил дорівнює відношенню магнітних потоків на прямолінійній ділянці характеристики намагнічування. На насиченій частині кривої за умовами однакової зміни намагнічуючих сил, магнітний потік змінюється менше.

При регулюванні поля відключенням частини витків головного полюса коефіцієнт регулювання збудження:

$$\alpha = \frac{F_{оп}}{F_{пн}} = \frac{I \cdot w_1}{(I \cdot w)} = \frac{w_1}{w} \tag{2}$$

де w_1 – число витків, що залишилося після відключення;

w – повне число витків обмотки збудження.

Секція обмотки збудження, що виключається, повинна бути від'єднана від кола, інакше вона виявиться замкнутою накоротко і при різких змінах струму ТЕД у ній буде наводитися електрорухома сила взаємодукції, як у вторинній обмотці трансформатора. Оскільки частина обмотки закорочена, в ній виникають струм і намагнічуюча сила, яка буде спрямована зустрічно потоку збудження обмотки, що залишилася. У результаті буде затримуватися процес зміни магнітного потоку і при різких коливаннях напруги в контактній мережі може бути порушена нормальна комутація і виникнути коловий вогонь на колекторі тягового електродвигуна.

Спосіб регулювання швидкості відключенням частини витків обмотки збудження застосовують звичайно при відносно неглибокому ослабленні поля, коли воно виконується однією ступеню (рис. 1, а).

При схемах з кількома двигунами (рис. 1, б) можна зменшити процес коливання сили тяги, якщо виконувати відключення обмоток по черзі. При цьому якщо двигуни з'єднані послідовно - буде значна різниця в напругах живлення якорів, а якщо паралельно, то виникає різниця струмових навантажень. На рис. 1, б надано двоступінчастий перехід. При цьому першим включається контактор 2 і відключається контактор 1, виводячи частину витків обмотки першого двигуна W_{c12} , а потім включається контактор 3 і відключається контактор 2, виводячи частину витків другого двигуна W_{c21} . Тут перша ступінь ослаблення поля використовується як перехідна.

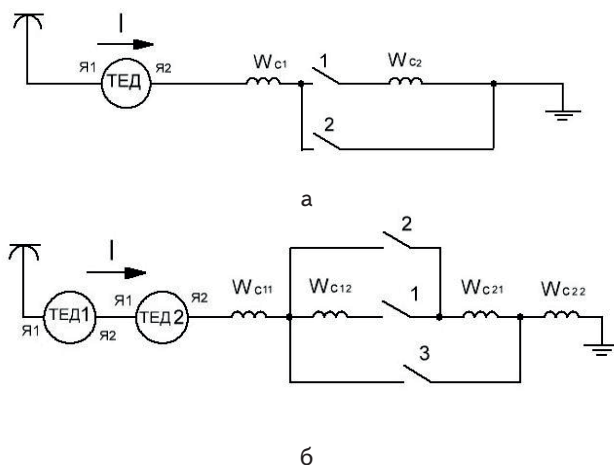


Рис. 1. Схеми ослаблення поля відключенням частини витків обмотки збудження: а – однодвигуновий привід, б – дводвигуновий привід

Виконуючи певним чином переключення в обмотці збудження і підбираючи певне число витків у секціях, можна досягти регулювання ослаблення поля в досить широкому діапазоні.

При використанні резисторів залишається незмінним число витків, а змінюється струм обмотки збудження, тому:

$$\alpha = \frac{I_3 \cdot w}{I \cdot w} = \frac{I_3}{I} \tag{3}$$

де I_3, I – відповідно струм збудження і струм якоря тягового електродвигуна.

Величину коефіцієнта регулювання збудження можна також визначити за співвідношенням опорів обмотки збудження r_3 і кола шунта $r_{ш}$:

$$\alpha = \frac{r_{ш}}{(r_3 + r_{ш})} \tag{4}$$

З рівняння (4) видно, що змінюючи опір $r_{ш}$ можна одержати будь-яку величину коефіцієнта ослаблення поля. На рис. 2, а надана схема ослаблення збудження з використанням активного опору.

За допомогою додаткових контакторів можна одержати практично будь-яке число ступенів ослаблення поля.

Вказані способи регулювання збудження мають такі переваги та недоліки:

1) При регулюванні поля з використанням переключення обмоток тягового електродвигуна необхідно мати додаткові виводи від обмоток збудження, що приводить до деякого збільшення радіальних розмірів, ваги й ускладненню конструкції тягового електродвигуна. Але при використанні секціонування обмоток виходять більш стабільні швидкісні й тягові характеристики ТЕД, тому що на ступінь ослаблення поля практично не впливає температура обмоток збудження;

2) При регулюванні поля з використанням активних опорів крім резисторів і контакторів потрібні додаткові апарати - індуктивні шунти. Також при використанні резисторів на відхилення характеристик від розрахункових впливає температура обмоток, опір контактів і проводів у силовому колі, а також допуски на опори. Крім того в цьому разі відбуваються втрати енергії в опорах ослаблення поля.

3) До недоліків перерахованих схем також необхідно віднести той факт, що струм якоря двигуна при ослабленні поля змінюється спупінчасто, що призводить до збільшення динамічних навантажень в тяговій передачі рухомого складу.

Система плавного регулювання струму збудження з використанням спеціального збудника надано на рис. 2, б.

Принцип дії такого способу полягає в тому, що паралельно обмотці збудження *C1-C2* через додатковий резистор *r* підключається спеціальний збуджувач *ЗБ* [8]. Змінюючи струм збудження збуджувача, можна регулювати ослаблення поля тягового двигуна. Такий збуджувач конструктивно може бути виконаний як електромашинним, так і напівпровідниковим.

Схема знайшла застосування на електрорухомому складі при необхідності зміни збудження двигунів послідовного збудження в режимі рекуперації. Резистор *r* необхідний, щоб від одного збуджувача можна було здійснювати живлення декількох обмоток паралельно включених тягових електродвигунів.

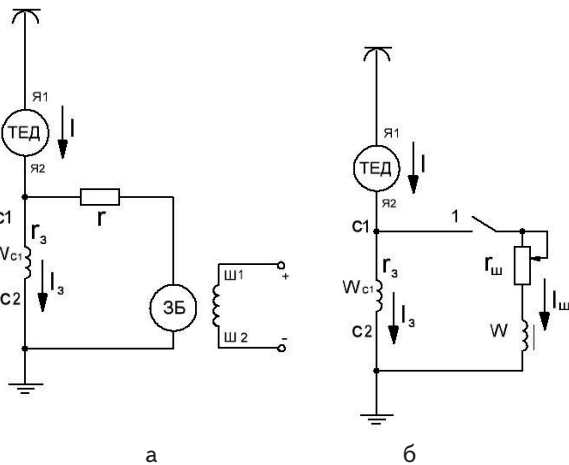


Рис. 2. Схеми ослаблення збудження: а – з використанням активного опору; б – з використанням збуджувача

Спосіб регулювання магнітного потоку для тягових електродвигунів змішаного збудження залежить від його виконання. При перевазі намагнічувальної сили паралельної обмотки збудження, ослаблення поля здійснюється зменшенням струму в ній.

При переважанні намагнічувальної сили послідовної обмотки збудження звичайно перша ступінь ослаблення поля виконується відключенням шунтової обмотки, а наступні ступені - шляхом шунтування серієсної обмотки активним опором.

Способи регулювання частоти обертання електричних двигунів змішаного збудження мають такі недоліки: ступінчатість регулювання; погане використання міді шунтової обмотки; низька стабільність швидкісних характеристик; додаткові витрати електроенергії на шунтових реостатах.

На основі аналізу різних способів ослаблення поля знайдено напрямок удосконалення схем регулювання швидкості двигунів змішаного збудження за допомогою DC-DC перетворювача [9]. Ослаблення поля ТЕД змішаного збудження в цьому випадку виконується за допомогою зміни струму в шунтовій обмотці, намагнічуюча сила якої направлена зустрічно намагнічуючій силі послідовної обмотки. Схема ослаблення поля двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача надано на рис. 3.

На схемі (рис. 3) прийняті наступні позначення: $I_{зб}$ – струм серієсної обмотки збудження; $I_я$ – струм якоря тягового двигуна; $I_{ш}$ – струм шунтової обмотки; $I_{вх}$ – вхідний струм DC-DC перетворювача; *Я1-Я2* – обмотка якоря; *C1-C2* – серієсна обмотка; *Ш1-Ш2* – шунтова обмотка збудження; *D0* – зворотній діод для зниження перенапруг при відключенні шунтової обмотки.

Ступінь ослаблення поля тягового двигуна змішаного збудження при зустрічному включенні послідовної та шунтової обмоток можна представити в наступному вигляді:

$$\alpha = \frac{I_{зб} \cdot W_C - I_{ш} \cdot W_{ш}}{I_{зб} \cdot W_C + I_{ш} \cdot W_{ш}} \quad (5)$$

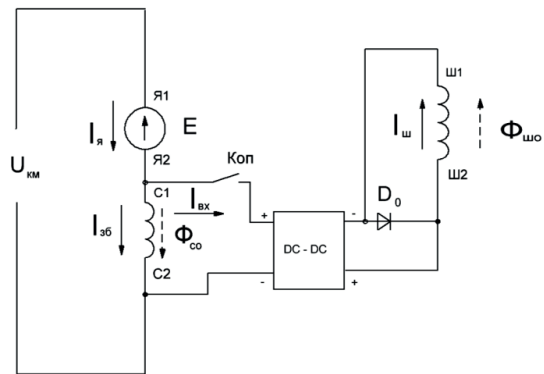


Рис. 3. Схема ослаблення поля двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка та випробування пристрою для регулювання частоти обертання тягових електричних двигунів постійного струму мішаного

збудження, який вільний від недоліків притаманних традиційним способам ослаблення поля.

Завданнями роботи є:

- аналіз схем DC-DC перетворювачів для можливості їх застосування в якості пристроїв регулювання магнітного потоку електричних двигунів;
- розробка схеми ослаблення поля двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача
- розробка схеми стенду для фізичного моделювання різних режимів роботи електроприводу;
- дослідження придатності DC-DC перетворювача для ослаблення поля електричних двигунів.

4. Результати досліджень способу регулювання збудження тягових двигунів постійного струму з використанням DC-DC перетворювача

Результатами досліджень є розроблена принципова схема випробувального стенду для перевірки та випробування способу ослаблення поля двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача надана на рис. 4.

В якості пристрою для ослаблення поля було застосовано підвищуючий DC-DC перетворювач [10] без гальванічної розв'язки між вхідними та вихідними колами.

На принциповій схемі випробувального стенду прийняті наступні позначення: *T1* – понижуючий трансформатор; *M* – обмотка якоря двигуна змішаного збудження; *G* – навантажувальний генератор постійного струму з незалежним збудженням; *BR* – тахогенератор із збудженням від постійних магнітів; *VT1* – вихідний транзистор широтно-імпульсного регулятора; *VT2, VD4, L4* – відповідно транзистор, діод та індуктивність DC-DC перетворювача; *IC1-IC4* – датчики струму з гальванічною розв'язкою; *VDS1* – випрямляч для живлення допоміжних кіл; *VDS2* – випрямляч для живлення двигуна; *S1-S4* – перемикачі для створення відповідних режимів роботи стенду.

На рис. 5 показана осцилограма параметрів при пуску та ослабленні поля з використанням DC-DC перетворювача електричного двигуна змішаного збудження, яка отримана з використанням цифрового осцилографа при напрузі живлення 40 В.

На осцилограмі представлені наступні параметри випробувального двигуна. Канал №1 – частота обертання якоря; канал №2 – I_c – струм послідовної обмотки збудження; канал №3 – I_{DC} – струм вхідного кола DC-DC перетворювача; канал №4 – $I_{я}$ – струм якоря; канал №5 – $I_{ш}$ – струм шунтової обмотки або струм вихідного кола DC-DC перетворювача.

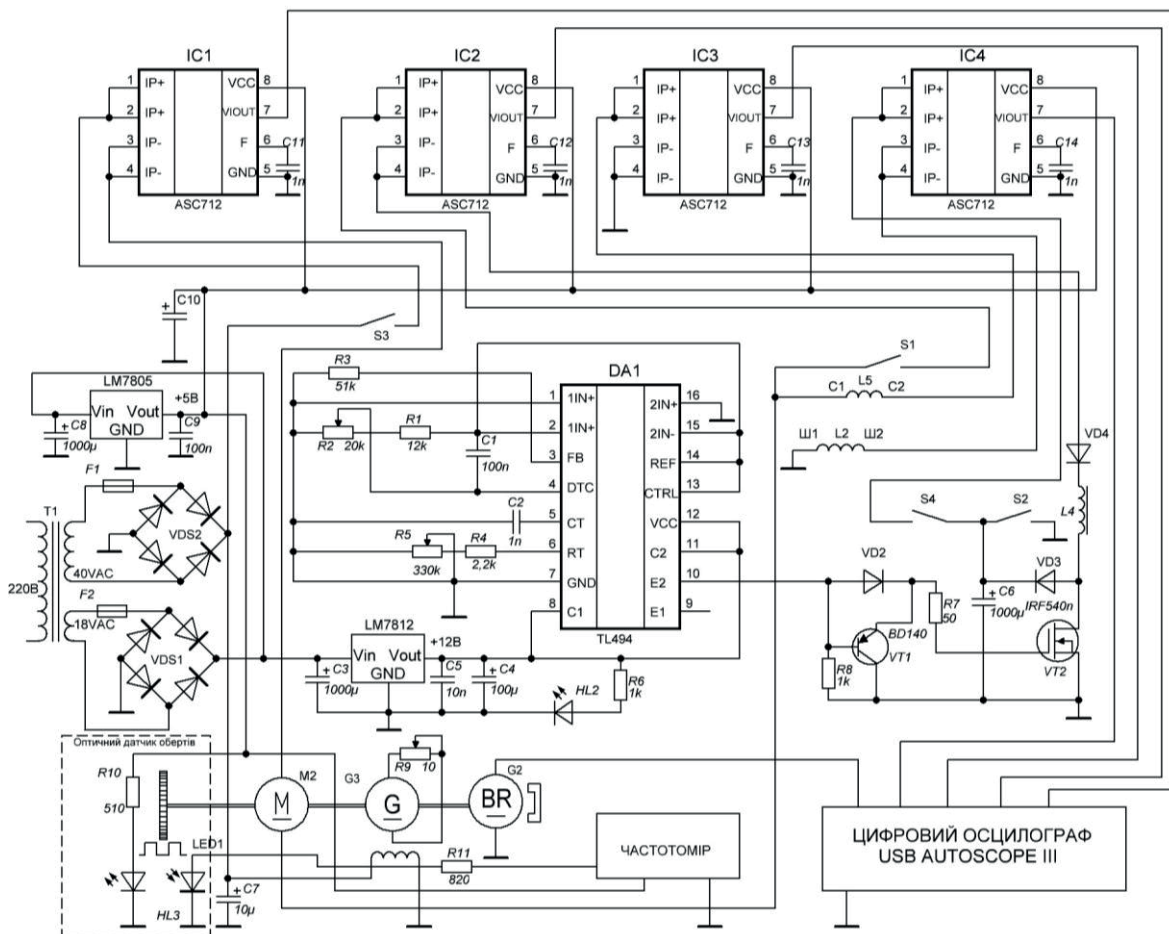


Рис. 4. Принципова схема випробувального стенду для перевірки та випробування способу ослаблення поля двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача

Аналіз осцилограми показує, що при пуску, який створювався замиканням перемикача $S3$, струм якоря двигуна скачкоподібно збільшився до $I_c = I_a = 2.4 \text{ A}$, а по мірі розгону струм I_a зменшився до 0.8 A . При пуску частота обертання якоря двигуна збільшилась від нуля до 950 об/хв . На осцилограмі цей період відповідає проміжку часу t_1-t_2 . Такий режим відповідає повному полю (ПП) роботи двигуна.

Режим ослабленого поля (ОП) створювався додатковим одночасним включенням перемикачів $S1$ та $S4$. При переході з режиму ПП на ОП частота обертання якоря двигуна збільшилась від 950 об/хв до 1300 об/хв . На осцилограмі цей період відповідає проміжку часу t_2-t_3 . Параметри двигуна при цьому змінились наступним чином: струм якоря I_a збільшився з 0.8 A до 1.7 A ; струм I_{DC} вхідного кола DC-DC перетворювача збільшився від нуля до 0.8 A ; струм $I_{ш}$ шунтової обмотки змінився від нуля до 0.4 A ; струм I_c послідовної обмотки збудження практично не змінився.

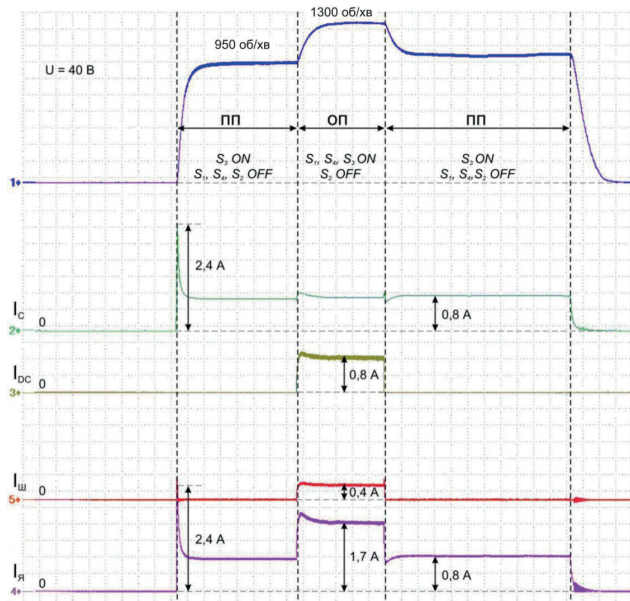


Рис. 5. Осцилограма параметрів при пуску та ослабленні поля електричного двигуна змішаного збудження з використанням DC-DC перетворювача

При переході з ОП на ПП (проміжок часу t_3-t_4) параметри двигуна прийняли значення, які відповідають режиму повного поля.

5. Висновки

Проведені дослідження на стенді фізичного моделювання різних режимів роботи електро-

приводу підтвердили можливість виконання плавного ослаблення поля електричних двигунів змішаного збудження за допомогою DC-DC перетворювача. Використання запропонованого способу дає можливість покращити використання міді шунтової обмотки, а також одержати економію електроенергії при експлуатації рухомого складу.

Література

1. Єфремов, И. С. Теория и расчет троллейбуса: Электрическое оборудование [Текст] / И. С. Єфремов, Г. Е. Косарев. – М.: Высш. шк., 1981. – 248 с.
2. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М.Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
3. Ротанов, Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом [Текст] / Н. А. Ротанов, Д. Д. Захарченко и др.; Под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
4. Патент № 2471652 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L15/08 Способ ослабления возбуждения тяговых электродвигателей локомотива [Текст] / В. Ф. Руденко, М. А. Егоров, Д. С. Спиридонов; заявитель и правообладатель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – № 2471652, заявл. 20.07.2011; опубл. 10.01.2013.
5. Москаленко, В. В. Автоматизированный электропривод [Текст] / В. В. Москаленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
6. Корягина, Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов [Текст] / Е. Е. Корягина, О. А Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
7. Байрыева, Л. С. Электрическая тяга: Городской наземный транспорт [Текст] / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М.: Транспорт, 1986. – 206 с.
8. Гаврилов, Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями [Текст] / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацканов. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
9. Патент №60109 Україна, МПК (2006.01) H02P 7/06 Спосіб ослаблення поля тягового електродвигуна змішаного збудження [Текст] / В. Ф. Харченко, В. Х. Далека, В. П. Андрійченко, І. О. Костенко; заявник та правласник ХНАМГ. – №60109; заявл. 23.11.10; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11
10. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника [Текст] / В. И. Мелешин. – Москва: Техносфера, 2005. – 632 с.