

УДК 629.421

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ  
ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ**

**М. І. Шпіка, к.т.н., В. П. Андрійченко, к.т.н.,  
В. А. Герасименко, аспірант**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ  
ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО  
ВОЗБУЖДЕНИЯ**

**Н. И. Шпика, к.т.н., В. П. Андрейченко, к.т.н.,  
В. А. Герасименко, аспирант**

**PERFECTION OF METHODS OF REGULATION THE SPEED OF TRACTION MOTORS  
DC WITH SERIES EXCITATION**

**Nicolay Shpika, PhD, Vladimir Andrejchenko, PhD,  
Vitalii Gerasymenko, postgraduate**

*Розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності пристроїв регулювання швидкості тягових електричних двигунів рухомого складу міського електричного*

транспорту. Запропонована модернізована схема ослаблення поля з використанням DC/DC перетворювача для тягових двигунів послідовного збудження. Наведено принципову електричну схему пристрою та результати досліджень DC/DC перетворювача.

**Ключові слова.** Ослаблення поля, DC/DC перетворювач, електрорухомий склад, потужність, регулювання, швидкість, транспорт.

*Rассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности устройств регулирования скорости тяговых двигателей подвижного состава городского электрического транспорта. Предложена модернизированная схема ослабления поля с использованием DC/DC преобразователя для тяговых электродвигателей последовательного возбуждения. Приведены принципиальная электрическая схема устройства и результаты исследований DC/DC преобразователя.*

**Ключевые слова.** Ослабление поля, DC/DC преобразователь, электроподвижной состав, мощность, регулирование, скорость, транспорт.

*The question of energy efficiency devices control the speed of electric motors of traction rolling stock of public electric transport. Reduce the cost of energy to the movement of vehicles is a promising area of development. The proposed scheme modernized weakening of the field using a DC/DC converter for traction engines successive excitation. To implement the method of the present weakening of the field in the laboratory was manufactured high-frequency converter. Save energy by using the proposed device will be achieved due to the fact that the DC/DC converter transforms the energy with high efficiency, which serial circuits spent on heating resistors, and sends it to power the motor. Shows circuit diagram of the device and the results of research DC/DC converter.*

**Keywords.** Field weakening, DC/DC converter of electric composition, power steering, speed, transport.

### 1. Вступ.

Як відомо з практики, ціни на енергоносії зростають з темпом до 10% на рік. Це відповідно веде до збільшення енергетичної складової затрат в енергоємних галузях до яких належить і електричний транспорт. У цих умовах перспективним напрямком підвищення ефективності електричного транспорту є розробка та впровадження сучасних пристроїв та технологій, які б сприяли зниженню витрат енергії на рух транспортних засобів.

### 2. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями.

На даний час для розширення діапазону регулювання швидкості електричного транспорту з тяговими двигунами послідовного збудження застосовують режим ослаблення поля (ОП) за рахунок зменшення величини магнітного потоку. Розробка та застосування енергозберігаючих пристроїв для регулювання частоти обертання тягових двигунів послідовного збудження є важливою практичною задачею.

### 3. Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Зазвичай регулювання ступенів ОП на електрорухомому складі з тяговими

двигунами послідовного збудження виконується за рахунок активних опорів, які підключаються паралельно послідовній обмотці [1-5] або переключенням обмоток збудження [6-10].

Застосування способу ОП з використанням активного опору має наступні недоліки:

- ступінчастість зміни струму якоря двигуна при виконанні регулювання;
- погана стабільність швидкісних характеристик за рахунок нагрівання та зміни опору резисторів;
- необхідність застосування індуктивного шунта, для уникнення аварійних режимів тягових двигунів при короткочасних відривах струмоприймача від контактного проводу;
- втрати потужності в шунтуючих опорах.

Застосування способу ОП з переключенням обмоток збудження призводить до ускладнення конструкції тягових двигунів.

### 4. Визначення цілей та задач дослідження.

Завданням роботи є отримання математичних залежностей між параметрами

## Автоматизовані системи електричного транспорту

високочастотного перетворювача та коефіцієнтом регулювання збудження тягового двигуна.

### 5. Основна частина досліджень.

На підставі аналізу способів ОП було визначено напрям удосконалення регулювання частоти обертання ТЕД послідовного збудження з використанням DC/DC перетворювача [3]. Запропонований спосіб ОП з використанням DC/DC перетворювача представлений на рис. 1.

Принцип дії схеми полягає в тому, що за допомогою вхідного кола DC/DC перетворювача виконується шунтування

послідовної обмотки збудження при включенні контактора Коп. Вихід перетворювача включений паралельно з живлячою мережею через розділовий діод.

Економія енергії при використанні запропонованого пристрою досягається за рахунок того, що DC/DC перетворювач трансформує енергію з високим коефіцієнтом корисної дії, яка в серійних схемах витрачалася на нагрів резисторів, і направляє її для живлення ТЕД.

Плавність і міра ОП досягається за рахунок зміни коефіцієнта заповнення перетворювача за певним законом в залежності від параметрів тягового двигуна.

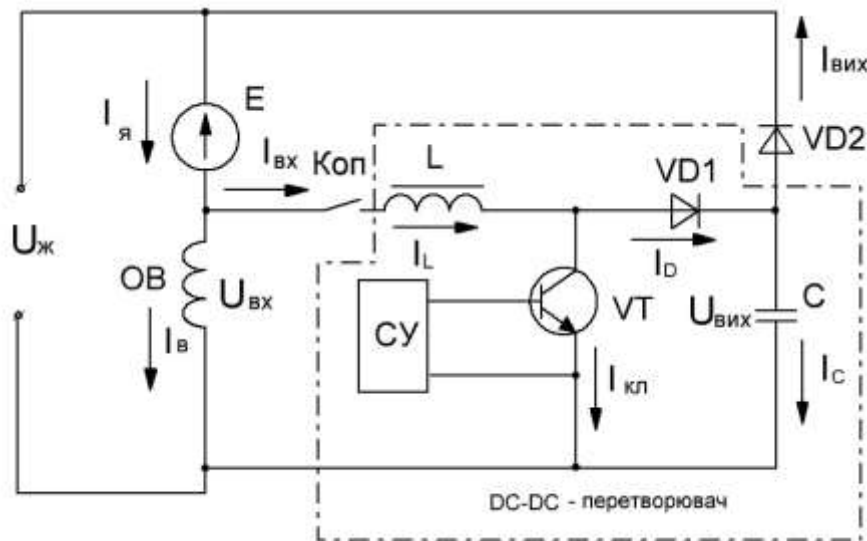


Рис. 1 – Принципова електрична схема ослаблення поля з використанням високочастотного перетворювача

Знайдемо залежність між параметрами високочастотного перетворювача та коефіцієнтом регулювання збудження тягового двигуна.

Рівняння для регульовальної характеристики підвищуючого без трансформаторного DC/DC перетворювача має наступний вигляд

$$U_{вих} = \frac{U_{вх}}{(1 - \gamma)}, \quad (1)$$

де:  $U_{вих}$  – вихідна напруга DC/DC перетворювача, яка в прийнятій схемі дорівнює напрузі контактної мережі;

$U_{вх}$  – вхідна напруга перетворювача, яка відповідає падінню напруги на обмотці послідовного збудження тягового електродвигуна.

Знайдемо співвідношення між параметрами запропонованої схеми і відповідно до закону збереження енергії можна записати наступне рівняння для вхідних і вихідних кіл перетворювача

$$I_{вх} \cdot U_{вх} = I_{вих} \cdot U_{вих} \cdot K_{DC}, \quad (2)$$

де:  $I_{вх}$ ,  $I_{вих}$  – відповідно до схеми вхідний і вихідний струм DC/DC перетворювача;

$K_{DC}$  – коефіцієнт корисної дії перетворювача.

Підставимо у вираз (2) значення вихідної напруги перетворювача

$$I_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вх}} = I_{\text{вих}} \frac{U_{\text{вх}}}{1 - \gamma} K_{DC} \quad (3)$$

Відповідно до схеми пристрою, яка представлена на рис. 1, вихідний струм буде дорівнювати:

$$I_{\text{вих}} = I_{\text{вх}} \frac{(1 - \gamma)}{K_{DC}} \quad (4)$$

У виразі (4) можна замінити  $I_{\text{вх}} = I_{\text{я}} - I_{\text{в}}$ :

$$I_{\text{вих}} = (I_{\text{я}} - I_{\text{в}}) \frac{(1 - \gamma)}{K_{DC}} \quad (5)$$

Розділивши вираз (5) на струм якоря ТЕД, отримаємо

$$\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{я}}} (1 - \gamma) = (1 - \gamma) - \frac{I_{\text{вих}} \cdot K_{DC}}{I_{\text{я}}} \quad (6)$$

Оскільки відношення  $I_{\text{в}}/I_{\text{я}} = \alpha$ , то:

$$\alpha = \frac{(1 - \gamma) - \frac{I_{\text{вих}} \cdot K_{DC}}{I_{\text{я}}}}{1 - \gamma} \quad (7)$$

Позначивши відношення  $I_{\text{вих}}/I_{\text{я}} = K_{\text{кн}}$  остаточно отримуємо вираз для коефіцієнта регулювання збудження:

$$\alpha = \frac{(1 - \gamma) - K_{\text{кн}} \cdot K_{DC}}{1 - \gamma} \quad (8)$$

де  $I_{\text{вих}}/I_{\text{я}} = K_{\text{кн}}$  – коефіцієнт навантаження пристрою.

Відповідно до виразу (8) побудовані дії перетворювача КDC при розрахунках був залежності зміни коефіцієнта регулювання збудження  $\alpha$  від коефіцієнта заповнення імпульсного переривника  $\gamma$ . Значення коефіцієнта навантаження  $K_{\text{кн}}$  змінювалось в діапазоні від 0,1 до 0,5. Коефіцієнт корисної дії перетворювача КDC при розрахунках був незмінним та дорівнював 0,9. Залежності ( $\alpha$ ) f ( $\gamma$ ) при різних значеннях коефіцієнта навантаження  $K_{\text{кн}}$  представлені на рис. 2.

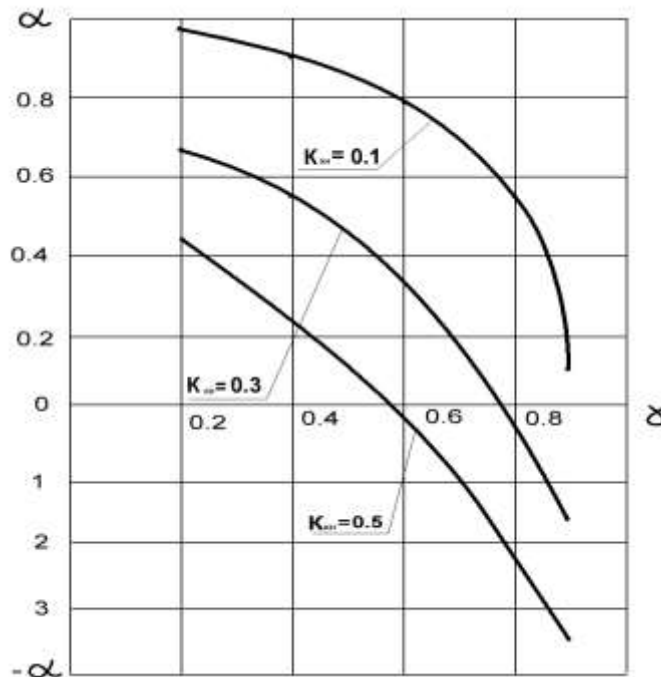


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта регулювання збудження  $\alpha$  від коефіцієнта заповнення  $\gamma$  DC/DC перетворювача

## Автоматизовані системи електричного транспорту

Для реалізації представленого способу ослаблення поля в лабораторних умовах був виготовлений

перетворювач, принципова схема якого показана на рис.3.

високочастотний

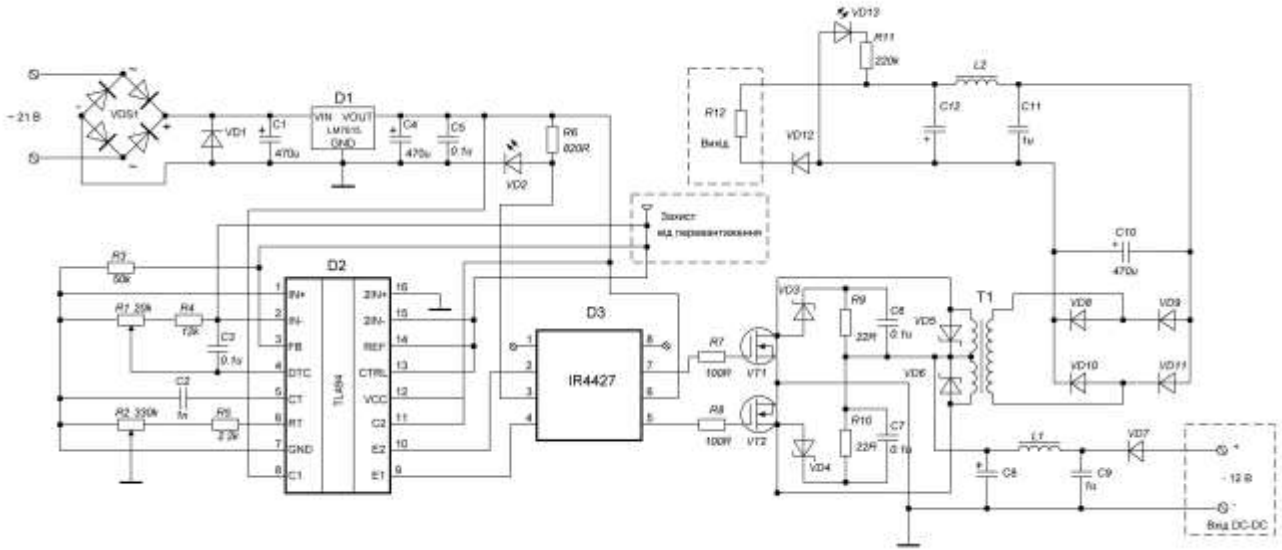


Рис. 3 –Принципова схема високочастотного DC/DC перетворювача

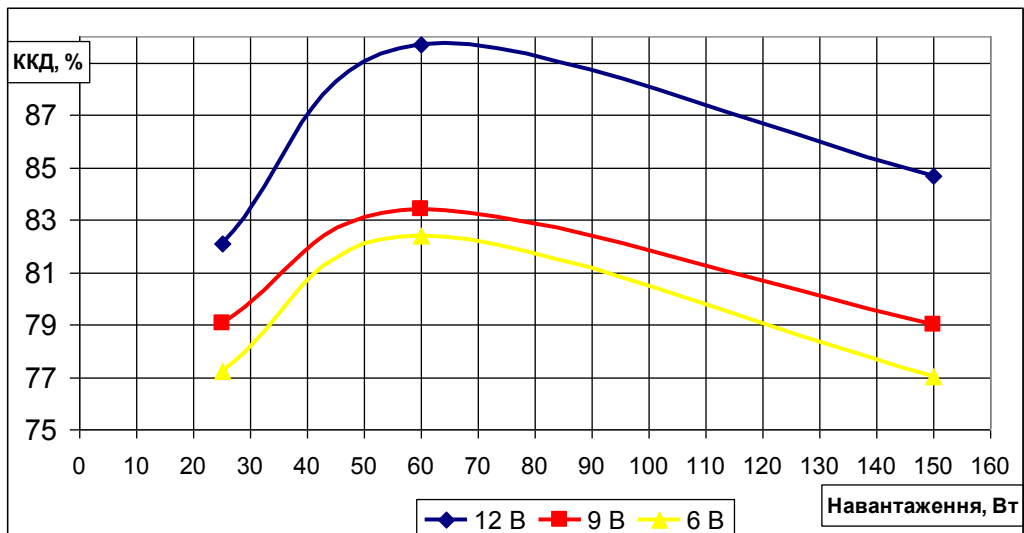


Рис. 4 – Залежність ККД перетворювача від потужності навантаження

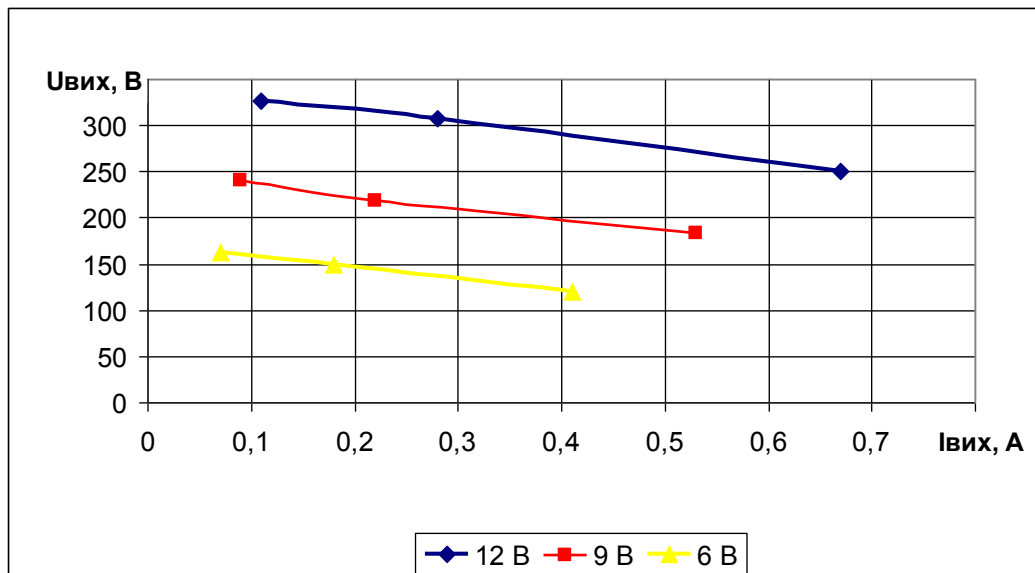


Рис. 5 – Залежність вихідної напруги перетворювача від струму навантаження

### 6. Виводи з досліджень та перспективи, подальший розвиток в даному напрямку.

З аналізу рис. 2 впливають наступні зауваження:

а) не лінійність залежності ( $\alpha$ ) та ( $\gamma$ ) збільшується при зменшенні коефіцієнта навантаження  $K_{кн}$ ;

б) при значеннях коефіцієнта навантаження  $K_{кн}$  більших за 0.1, та коефіцієнта заповнення імпульсного

переривника  $\gamma$  більших за 0.5 коефіцієнт регулювання збудження  $\alpha$  має негативні значення, що свідчить про непрацездатність запропонованого пристрою при даних режимах;

в) при розробці системи керування запропонованим пристроєм з широким діапазоном зміни коефіцієнта регулювання збудження  $\alpha$  необхідно щоб значення коефіцієнта навантаження  $K_{кн}$  не перевищувало 0.1.

### 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. 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.
3. Корягина, Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов [Текст] / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
4. Гаврилов, Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями [Текст] / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
5. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника [Текст] / В. И. Мелешин. – Москва: Техносфера, 2005. – 632 с.
6. Jitaru I.D. DC-DC Converter Technologies, APEC'96, Professional Education Seminar Workbook.
7. Korotkov S., Meleshin V., Nemchinov A., Fraidlin S. Small-Signal Modeling of Soft-Switched Asymmetrical Half Bridge DC/DC Converter. APEC'95, 1995.
8. Meleshin V., Yakushev V., Fraidlin S. Full-Bridge Isolated Current Fed Converter. APEC, 2000.
9. 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

## **Автоматизовані системи електричного транспорту**

---

акционерное общество «Российские железные дороги». – № 2471652, заявл. 20.07.2011; опубл. 10.01.2013.

10. Wittenbreder E.H. High Efficiency Coupled Inductor Soft Switching Power Converters. Патент США. №6272023B1. 2001.

---

Андрейченко Владимир Павлович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (066) 254 25 10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Шпика Николай Иванович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Герасименко Виталий Анатольевич, Аспирант кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

Андрійченко Володимир Павлович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (066) 254 25 10, E-mail: [andreychenko-vp@mail.ru](mailto:andreychenko-vp@mail.ru)

Шпіка Микола Іванович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Герасименко Віталій Анатолійович, Аспирант кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

Vladimir Andreychenko, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, Department of electric transport, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Revolution, 12, Kharkiv, Ukraine, 61002, Contact tel.: 066-254-25-10, E-mail: [andreychenko-vp@mail.ru](mailto:andreychenko-vp@mail.ru)

Shpika Nicolay, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Gerasymenko Vitalii, Postgraduate in electrical transport, Kharkiv National University of urban im.A.N.Beketova, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

***Стаття постуила 21.04.2015***