

УДК 629.4

В.П.АНДРЕЙЧЕНКО, С.А.ЗАКУРДАЙ, кандидати техн. наук

А.М.МОВЧАН

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова*

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНІВ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ**

В статті розглянуто перспективи підвищення енергоефективності електричного транспорту за допомогою впровадження сучасних пристроїв силової електроніки. Запропоновано пристрій для регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження. Визначено необхідну ємність імпульсного конденсатора для реалізації запропонованого пристрою. Показані переваги використання DC-DC перетворювача для регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження та для підзарядки акумуляторної батареї.

В статье рассмотрены перспективы повышения энергоэффективности электрического транспорта за счет внедрения современных устройств силовой электроники. Предложено устройство для регулирования частоты вращения двигателей последовательного возбуждения. Определена необходимая емкость импульсного конденсатора для реализации предлагаемого устройства. Показаны преимущества использования DC-DC преобразователя для регулирования частоты вращения двигателей последовательного возбуждения и для подзарядки аккумуляторной батареи.

The paper considers the prospects for electric vehicles energy efficiency by implementing advanced power electronics devices. A device for adjusting engine speed sequential excitation. The necessary capacity pulse capacitor for the proposed device. The advantages of DC-DC converter to regulate the engine speed sequential excitation and for recharging the battery.

*Ключові слова:* міський електричний транспорт, електрична енергія, тяговий електродвигун, ємність імпульсного конденсатора, енергоефективність, ослаблення поля, DC-DC перетворювач.

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.

На даний час для розширення діапазону регулювання швидкості електричного транспорту з тяговими двигунами послідовного збудження застосовують режим ослаблення поля за рахунок зменшення величини магнітного потоку.

Зазвичай регулювання ступенів ослаблення поля виконується за рахунок активних опорів, які підключаються паралельно послідовній

обмотці збудження. Застосування такого способу ослаблення поля має наступні недоліки:

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

Електрична принципова схема енергоефективного пристрою для регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження показана на рис.1.

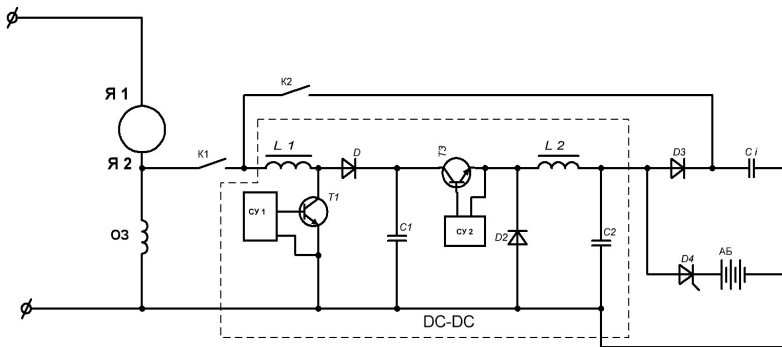


Рис. 1 – Електрична принципова схема енергоефективного пристрою для регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження

Схема працює наступним чином. Ослаблення поля двигуна починається при замиканні контактора K1 і починає працювати комбінований DC-DC перетворювач. Система керування CV1 переводить транзистор T1 в режим широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) транзистор T2 повністю відкритий. DC-DC перетворювач працює як підвищуючий імпульсний регулятор і виконує зарядку імпульсного конденсатора великої ємності C1.

При роботі в інших режимах контактор K1 відключається і включається контактор K2, а також подається керуючий імпульс на тиристор VT1. За рахунок цих переключень вхід комбінованого DC-DC перетворювача підключається до імпульсного конденсатора C1, а вихід до акумуляторної батареї.

Залежно від співвідношення напруг імпульсного конденсатора та акумуляторної батареї комбінований DC-DC перетворювач буде працювати або як підвищуючий, або як понижуючий. При цьому практично вся енергія імпульсного конденсатора буде використана для підзарядки акумуляторної батареї [1].

Визначимо необхідну ємність імпульсного конденсатора для реалізації запропонованого пристрою [2].

Струм через конденсатор зв'язаний з його зарядом  $q$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CU_c)}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (1)$$

Середній струм в конденсаторі за час заряду  $t_3$

$$I_{cp} = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} i_c dt = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} C \frac{dU_c}{dt} dt = \frac{C}{t_3} U_k \left( 1 - \frac{U_0}{U_k} \right), \quad (2)$$

де  $U_k$  – напруга на конденсаторі в кінці заряду;  $U_0$  – напруга на конденсаторі на початку заряду.

Напруга на конденсаторі в різні періоди часу можна знайти, якщо проінтегрувати вираз (1)

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt + U_c. \quad (3)$$

Приріст енергії в конденсаторі за час заряду з урахуванням виразу (1).

$$W_3 = \int_0^{t_3} U_c i_c dt = \int_0^{t_3} U_c C \frac{dU_c}{dt} dt = C \int_{U_0}^U U_c dU_c = \frac{C}{2} (U_k^2 - U_0^2). \quad (4)$$

Знайдемо приріст енергії в конденсаторі за час заряду через величину середнього струму. З цієї метою в рівняння (4) підставимо значення ємності, яка знайдено з виразу (2)

$$C = \frac{I_{cp} t_3}{U_k \left( 1 - \frac{U_c}{U_n} \right)}. \quad (5)$$

Отримаємо:

$$W_3 = \frac{I_{cp} t_3}{U_k \left( 1 - \frac{U_c}{U_n} \right)^2} (U_k^2 - U_0^2) = \frac{I_{cp}}{2} (U_k - U_0) t_3. \quad (6)$$

Середня потужність, яка отримується конденсатором за час заряду

$$P_3 = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} U_c i_c dt = \frac{I_{cp}}{2} (U_k + U_0). \quad (7)$$

Знайдемо середню потужність з урахуванням значення середнього струму заряду

$$P_3 = \frac{CU_k \left( \frac{1-U_0}{U_k} \right) (U_k + U_0)}{2t_3}. \quad (8)$$

Приймемо напругу на конденсаторі на початку заряду рівну нулю. При цьому рівняння (8) приймає вигляд

$$P_3 = \frac{CU_k^2}{2t_3}. \quad (9)$$

Знайдемо величину потужності, яка витрачається в колі ослаблення поля тягового двигуна постійного струму.

$$P_\alpha = U_3 I_u, \quad (10)$$

де  $U_3$  – напруга на обмотці збудження в режимі ослаблення поля;  $I_u$  – струм шунтуючого кола

$$I_u = I + I_3 = I - I_\alpha = I(1 - \alpha), \quad (11)$$

де  $I$  – струм якоря двигуна;  $I_3$  – струм збудження ТЕД.

$$U_3 = I \frac{R_u R_3}{R_u + R_3}. \quad (12)$$

Коефіцієнт ослаблення поля [3]

$$\alpha = \frac{R_u}{R_u + R_3}. \quad (13)$$

З урахуванням виразів (10),(11),(12),(13) потужність в колі ослаблення поля

$$P_\alpha = I \frac{R_u R_3}{R_u + R_3} I(1 - \alpha) = I^2 R_3 \alpha (1 - \alpha). \quad (14)$$

З урахуванням того, що в представленій схемі потужність, що отримується конденсатором за час заряду повинна дорівнювати потужності кола ослаблення поля, то необхідно прирівняти праві частини рівнянь (14) та (9)

$$\frac{CU_k}{2t_3} = I^2 R_3 \alpha (1 - \alpha). \quad (15)$$

З рівняння (15) знайдемо величину необхідної ємності конденсатора для реалізації запропонованого пристрою

$$C = \frac{2I^2 R_3 \alpha (1 - \alpha) t_3}{U_k^2}. \quad (16)$$

Знайдемо необхідну ємність конденсатора при використанні ТЕД ДК-211-А при різних ступенях ослаблення поля, з урахуванням того, що  $t_3 = 60$  с,  $U_k = 24$  В,  $U_k = 48$  В,  $R_3 = 0,068$  Ом та  $\alpha_1 = 0,7$ ;  $\alpha_2 = 0,5$ ;  $\alpha_3 = 0,3$ . Дані розрахунків наведені у табл. 1-3.

Таблиця 1 – Розрахунок ємності конденсатора  
при  $\alpha = 0,7$   $U_k = 24$  В,  $U_k = 48$  В

$\alpha = 0,7$ $U_k = 24$ В						$\alpha = 0,7$ $U_k = 48$ В				
I, А	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
C, Ф	29,75	74,07	118,4	192,2	266	7,4	18,7	30	48	66

Таблиця 2 – Розрахунок ємності конденсатора  
при  $\alpha = 0,5$   $U_k = 24$  В,  $U_k = 48$  В

$\alpha = 0,5$ $U_k = 24$ В						$\alpha = 0,5$ $U_k = 48$ В				
I, А	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
C, Ф	32,25	86,62	141	229	317	9	22	35	57,5	80

Таблиця 3 – Розрахунок ємності конденсатора  
при  $\alpha = 0,3$   $U_k = 24$  В,  $U_k = 48$  В

$\alpha = 0,3$ $U_k = 24$ В						$\alpha = 0,3$ $U_k = 48$ В				
I, А	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
C, Ф	29,75	74,07	118,4	192,2	266	7,4	18,7	30	48	66

За розрахунковими даними будуємо залежність необхідної ємності від струму якоря двигуна при різних коефіцієнтах та різних напругах заряду (рис. 2).

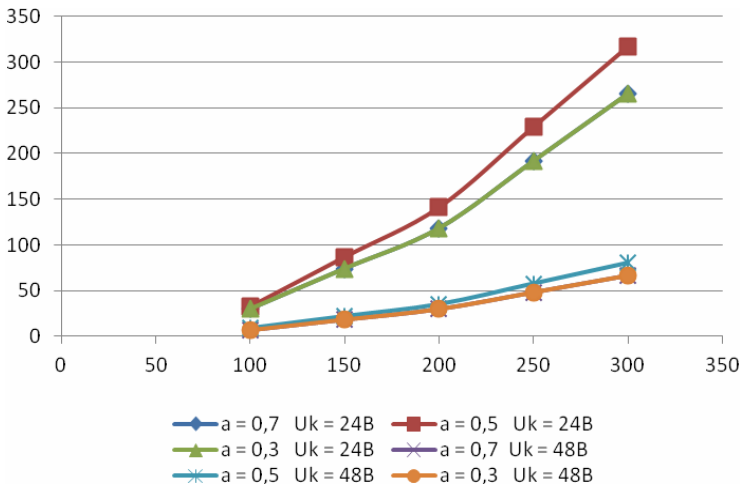


Рис. 2 – Залежність необхідної ємності від струму якоря двигуна при різних коефіцієнтах  $a$  та напруг заряду

Застосування запропонованого пристрою для регулювання ослаблення поля тягового двигуна послідовного збудження буде мати наступні переваги:

- будуть відсутні витрати енергії в резисторах ослаблення поля;
- регулювання швидкості рухомого складу буде безступінчастим;
- відпаде необхідність у використанні індуктивних шунтів;
- підвищаться стабільність швидкісних характеристик тягових електродвигунів рухомого складу;
- зменшуються витрати електроенергії на підзарядку акумуляторної батареї рухомого складу.

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
2. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
3. Корягина Е.Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов / Е.Е. Корягина, О.А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.

Отримано 26.12.2013