

Андрійченко В.П., Донець О.В., Костенко І.О.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ СКЛАДОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Харківська національна академія міського господарства

Розглядається вдосконалення системи керування рухомих складом міського електричного транспорту. Пропонується використання DC-DC перетворювача для ослаблення поля тягових електродвигунів змішаного збудження.

Ключові слова: DC-DC перетворювач, змішане збудження, ослаблення поля.

В багатьох містах України міський електричний транспорт відіграє велику роль в обслуговуванні населення. На його частку приходиться більше половини усіх міських перевезень пасажирів. Такий великий попит на електротранспорт спонукає до розгляду питання щодо підвищення ефективності рухомого складу, що експлуатується в даний час. Велика частина діючого рухомого складу має застарілу та не економічну резистивно-контакторну систему керування (РКСК). В статті пропонується вдосконалення РКСК за допомогою DC-DC перетворювача.

Питання щодо ослаблення поля тягових двигунів міського електричного транспорту розглядається в багатьох джерелах, здебільшого підручниках, з відповідними методиками розрахунків та аналізом [1, 2].

Дана система може працювати з двигунами змішаного збудження і забезпечує економічну та ефективну роботу в режимі ослаблення поля. Для полегшення розуміння роботи DC-DC перетворювача в режимі ослаблення поля розглянемо штатну систему ослаблення поля. Для прикладу візьмемо тяговий двигун ДК-210А3 тролейбуса ЗІУ-9. Ослаблення поля тягового двигуна ДК-210А3 виконується наступним чином: спочатку в коло шунтової обмотки

вводиться додатковий опір, тим самим зменшується струм збудження. На наступній стадії паралельно серійній обмотці підключаються шунтові опори.

Очевидною неекономічністю цієї системи є те, що енергія розсіюється у вигляді тепла на шунтуючих опорах. Вдосконалити цю систему можна наступним чином: замість шунтуючого опору ввімкнути вхід DC-DC перетворювача. Шунтову обмотку відключити від мережі і підключити до виходу DC-DC перетворювача але з протилежною полярністю. Подібне включення дозволяє економити енергію завдяки наступним чинникам:

- ККД DC-DC перетворювача знаходиться в межах 80-90 %;
- енергія, яка поступає на вхід DC-DC, майже без втрат спрямовується ослаблення поля завдяки реверсуванню струму в шунтовій обмотці.
- DC-DC перетворювач має незначні масо-габаритні показники і собівартість.

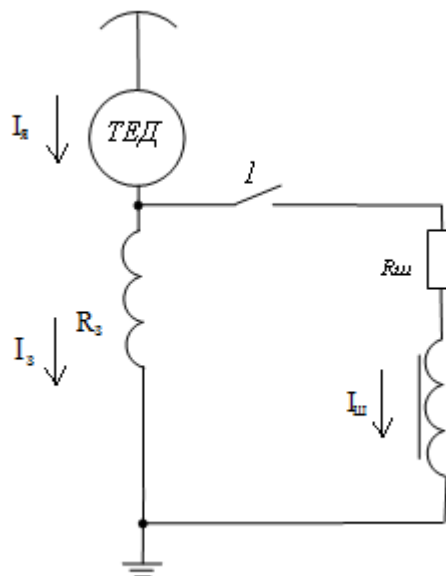


Рис.1 Ослаблення поля двигуна послідовного збудження

Отже, розглянемо підключення DC-DC перетворювача до двигуна як комбінацію послідовного збудження з шунтом, де шунт - це умовно вхід DC-DC, і незалежного збудження.

В першому випадку (рис.1) за умови нескінченно малого вихідного струму DC-DC отримаємо двигун з послідовним збудженням, в якому можна змінювати $R_{ш}$ для досягнення певної міри ослаблення поля [4].

$$\alpha = \frac{R_{\phi}}{R_{\zeta} + R_{\phi}}, \quad (1)$$

де: α – ступінь ослаблення поля двигуна;

R_{ζ} – опір послідовної обмотки збудження;

$R_{ш}$ – опір шунта (входу DC-DC).

Для цих же $R_{ш}$ визначені співвідношення струмів:

$$\frac{I_{\phi}}{I_{\zeta}} = \frac{R_{\zeta}}{R_{\phi}}; \quad (2)$$

$$I_{ш} + I_{\zeta} = I_{я}, \quad (3)$$

де: $I_{ш}$ - струм шунта;

I_{ζ} – струм обмотки збудження двигуна;

$I_{я}$ - струм якоря.

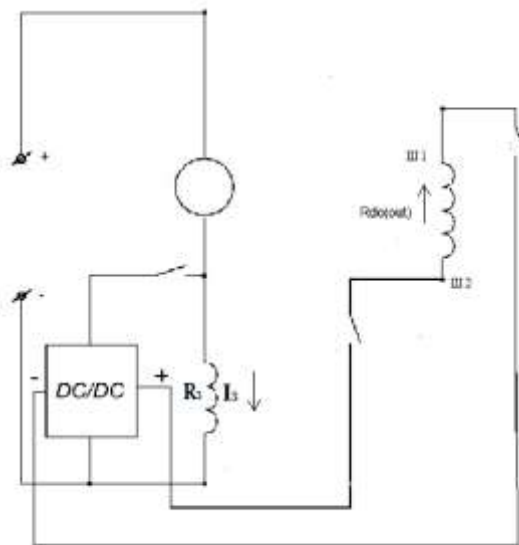


Рис. 2 Ослаблення поля двигуна змішаного збудження з DC-DC

В другому випадку (рис.2) допускаємо, що $R_{ш}$ задано і звідси визначається доля струму через R_{ζ} . Ослаблення поля в цьому випадку можна розглядати як взаємодію з паралельною, а точніше, з незалежною обмоткою. Вважаємо, що на попередньому етапі деякий струм протікає через $R_{ш}$ і вступає в дію додаткове ослаблення поля.

$$\alpha = \frac{F_{\text{ii}}}{F_{\text{ii}}} , \quad (4)$$

де: F_{on} – магнітно-рухома сила ослабленого поля;

$F_{\text{ш}}$ – магнітно-рухома сила повного поля.

$$F_{\text{on}} = I_3 \cdot W_3 - I_{\text{dc(out)}} \cdot W_{\text{dc(out)}} , \quad (5)$$

де: W_3 – витки обмотки збудження (24 для ДК210);

$W_{\text{dc(out)}}$ – витки паралельної обмотки, яка включена на вихід DC (930 для ДК 210А3) [1];

$I_{\text{dc(out)}}$ – вихідний струм DC-DC перетворювача (приймається з «-»), оскільки вихід ввімкнено з оберненої полярністю).

В першому випадку $I_{\text{dc(out)}} \rightarrow 0$ и $F_{\text{on}} = I_3 \cdot W_3$, для якої α була розрахована в попередньому випадку.

Для DC-перетворювача можна записати наступне рівняння з дотриманням закону збереження енергії :

$$I_{\text{dc(in)}}^2 \cdot R_{\text{ш}} = K_{\text{DC}} \cdot I_{\text{dc(out)}}^2 \cdot R_{\text{dc(out)}} , \quad (6)$$

де: $R_{\text{ш}} \equiv R_{\text{dc(in)}}$, а $I_{\text{ш}} \equiv I_{\text{dc(in)}}$;

$R_{\text{dc(out)}} = 950 \text{ Ом}$ (для ДК 210А3) [1];

K_{DC} – коефіцієнт корисної дії DC-DC $\approx 0,9$ [5].

З (2) маємо:

$$I_{\text{dc(in)}} = \frac{I_{\text{c}} \cdot R_{\text{c}}}{R_{\text{dc(in)}}} ;$$

Підставляємо $I_{\text{dc(in)}}$ в (6):

$$\left[\frac{I_{\text{c}} \cdot R_{\text{c}}}{R_{\text{dc(in)}}} \right]^2 \cdot R_{\text{dc(in)}} = \hat{E}_{\text{DC}} \cdot I_{\text{dc(out)}}^2 \cdot R_{\text{dc(out)}} ; \quad (7)$$

Із (7) визначаємо $I_{\text{dc(out)}}$:

$$I_{\text{dc(out)}}^2 = \frac{I_{\text{c}}^2 \cdot R_{\text{c}}^2 \cdot R_{\text{dc(in)}}}{R_{\text{dc(in)}}^2 \cdot K_{\text{DC}} \cdot R_{\text{dc(out)}}} \rightarrow I_{\text{dc(out)}} = \frac{I_{\text{c}} \cdot R_{\text{c}}}{\sqrt{R_{\text{dc(in)}} \cdot K_{\text{DC}} \cdot R_{\text{dc(out)}}}} ; \quad (8)$$

Підставимо (8) в (5):

$$F_{\text{ii}} = I_{\text{c}} \cdot W_{\text{c}} - I_{\text{c}} \cdot \frac{R_{\text{c}}}{\sqrt{R_{\text{dc(in)}} \cdot K_{\text{DC}} \cdot R_{\text{dc(out)}}}} \cdot W_{\text{dc(out)}} ;$$

$$F_{\text{нр}} = I_{\zeta} \cdot \left(W_{\zeta} - W_{\text{dc(out)}} \cdot \frac{R_{\zeta}}{\sqrt{K_{\text{DC}} \cdot R_{\text{dc(in)}} \cdot R_{\text{dc(out)}}}} \right). \quad (9)$$

Отже, розрахувати магнітно-рухомому силу F (А * вит) ослабленого поля з використання DC-DC перетворювача можна задаючись струмом збудження серійної обмотки, вхідним опором DC-DC та коефіцієнтом корисної дії DC-DC. Розглянемо відмінність характеристик м.р.с. для двигуна ДК-210А3 з використання DC-DC перетворювача и без нього.

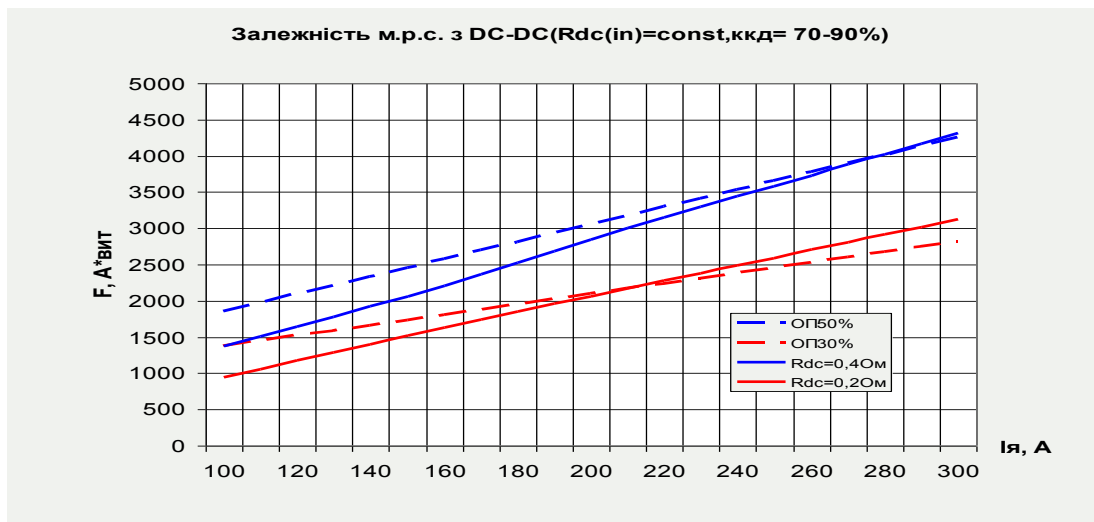


Рис. 3 Залежність м.р.с. з DC-DC (Rdc(in) = const)

Залежність F (А*вит) від струму якоря для різних ступенів ослаблення поля без DC-DC перетворювача, а також значення F (А*вит) з DC-DC та урахуванням фіксованого струму входу DC-DC наведені на рис. 3.

Відповідна залежність потужності DC-DC перетворювача від струму якоря представлена на рис. 4.

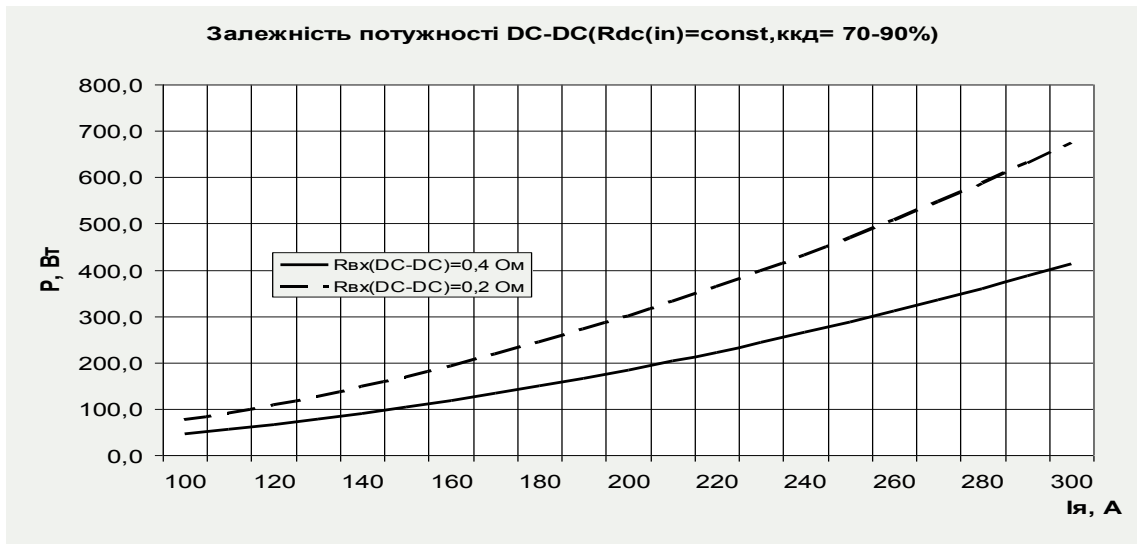


Рис. 4 Залежність потужності DC-DC перетворювача від струму якоря

Під «const» слід розуміти величину, яка задається оператором або системою керування з метою регулювання відповідних величин DC-DC перетворювача. Однак, на практиці отримати DC-DC з керованим вхідним опором досить складно, тому слід розглянути роботу DC-DC з регульованою вихідною напругою (в нашому випадку вихідний опір DC-DC фіксований).

$$I_{dc(in)}^2 + I_{\zeta}^2 = I_y^2; \quad (10)$$

маємо:

$$I_{dc(in)}^2 = I_y^2 - I_{\zeta}^2, \text{ звідки } I_{dc(in)}^2 \cdot R_{dc(in)} = D;$$

$$\text{маємо: } I_y^2 - I_{\zeta}^2 \cdot R_{dc(in)} = D; \quad (11)$$

$$I_{dc(in)}^2 \cdot R_{dc(in)} = I_{\zeta}^2 \cdot R_{\zeta} \text{ маємо:}$$

$$I_y^2 - I_{\zeta}^2 \cdot R_{dc(in)} = I_{\zeta}^2 \cdot R_{\zeta} \quad (12)$$

З (11) рівняння:

$$R_{dc(in)} = \frac{D}{I_y^2 - I_{\zeta}^2}; \quad (13)$$

Підставляємо в (12)

$$I_y^2 - I_{\zeta}^2 \cdot \frac{D}{I_y^2 - I_{\zeta}^2} = I_{\zeta}^2 \cdot R_{\zeta}, \Rightarrow$$

$$\frac{D}{I_y^2 - I_{\zeta}^2} = I_{\zeta} \cdot R_{\zeta} \Rightarrow D = I_{\zeta} \cdot R_{\zeta} \cdot (I_y^2 - I_{\zeta}^2);$$

$$I_{\zeta} \cdot R_{\zeta} \cdot I_{\bar{y}} - I_{\zeta}^2 \cdot R_{\zeta} = P \Rightarrow R_{\zeta} \cdot I_{\zeta}^2 - R_{\zeta} \cdot I_{\bar{y}} \cdot I_{\zeta} + P = 0;$$

Оскільки $R_{\zeta} \neq 0$, можна розділити рівняння на R_{ζ} :

$$I_{\zeta}^2 - \frac{R_{\zeta}}{R_{\zeta}} \cdot I_{\bar{y}} \cdot I_{\zeta} + \frac{P}{R_{\zeta}} = 0 \Rightarrow$$

$$I_{\zeta}^2 - I_{\bar{y}} \cdot I_{\zeta} + \frac{P}{R_{\zeta}} = 0.$$

Складемо квадратне рівняння типу $a\delta^2 + b\delta + c = 0$ відносно I_{ζ} з відповідними підстановками:

$$I_{\zeta}^2 = \delta; \quad a = 1; \quad -I_{\bar{y}} = b; \quad \frac{P}{R_{\zeta}} = c;$$

Корені рівняння $I_{\zeta}^{(1)}$ і $I_{\zeta}^{(2)}$ перевіряємо на допустимість і підставляємо в (13):

$$R_{\text{dc(in)}}^1 = \frac{D}{I_{\bar{y}} - I_{\zeta}^{(1)}};$$

$$R_{\text{dc(in)}}^2 = \frac{D}{I_{\bar{y}} - I_{\zeta}^{(2)}}.$$

$I_{\zeta}^{(1)}$ і $I_{\zeta}^{(2)}$ підставляємо в (10) отримаємо також два струми:

$$I_{\text{dc(in)}}^{(1)} = I_{\bar{y}} - I_{\zeta}^{(1)}$$

$$I_{\text{dc(in)}}^{(2)} = I_{\bar{y}} - I_{\zeta}^{(2)}$$

Корені рівняння (з урахуванням $a = 1$):

$$\delta_1 = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4a \cdot \bar{n}}}{2a} = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4\bar{n}}}{2}$$

$$\delta_2 = \frac{-a - \sqrt{a^2 - 4a \cdot \bar{n}}}{2a} = \frac{-a - \sqrt{a^2 - 4\bar{n}}}{2}$$

$$D = b^2 - 4\bar{n}$$

Якщо $D > 0$, то рівняння має два різних дійсних кореня;

Якщо $D = 0$, то обидва корені рівняння дійсні і рівні;

Якщо $D < 0$, то корені рівняння комплексні.

В нашому випадку:

$$D = 2^2 - \frac{4D}{R_{\zeta}};$$

$$z_{\zeta}^{(1)} = \frac{+ 2 + \sqrt{2^2 - \frac{4D}{R_{\zeta}}}}{2}; \quad z_{\zeta}^{(2)} = \frac{+ 2 - \sqrt{2^2 - \frac{4D}{R_{\zeta}}}}{2}. \quad (14)$$

Підставивши корні рівняння в (9), отримаємо значення магнітно-рухомої сили для фіксованого значення вихідної напруги DC-DC перетворювача:

$$F_{\text{ит}} = \left[\frac{2 - \sqrt{2^2 - \frac{4D}{R_{\zeta}}}}{2} \right] \cdot \left(W_{\zeta} - W_{\text{dc(out)}} \cdot \frac{R_{\zeta}}{\sqrt{K_{DC} \cdot R_{\text{dc(in)}} \cdot R_{\text{dc(out)}}}} \right). \quad (15)$$

Залежність $F(I_{\text{я}})$ для різних ступенів ослаблення поля без DC-DC перетворювача, а також значення м.р.с. з DC-DC з урахуванням вихідної напруги (регулювання з певним кроком) DC-DC приведені на рис. 5.

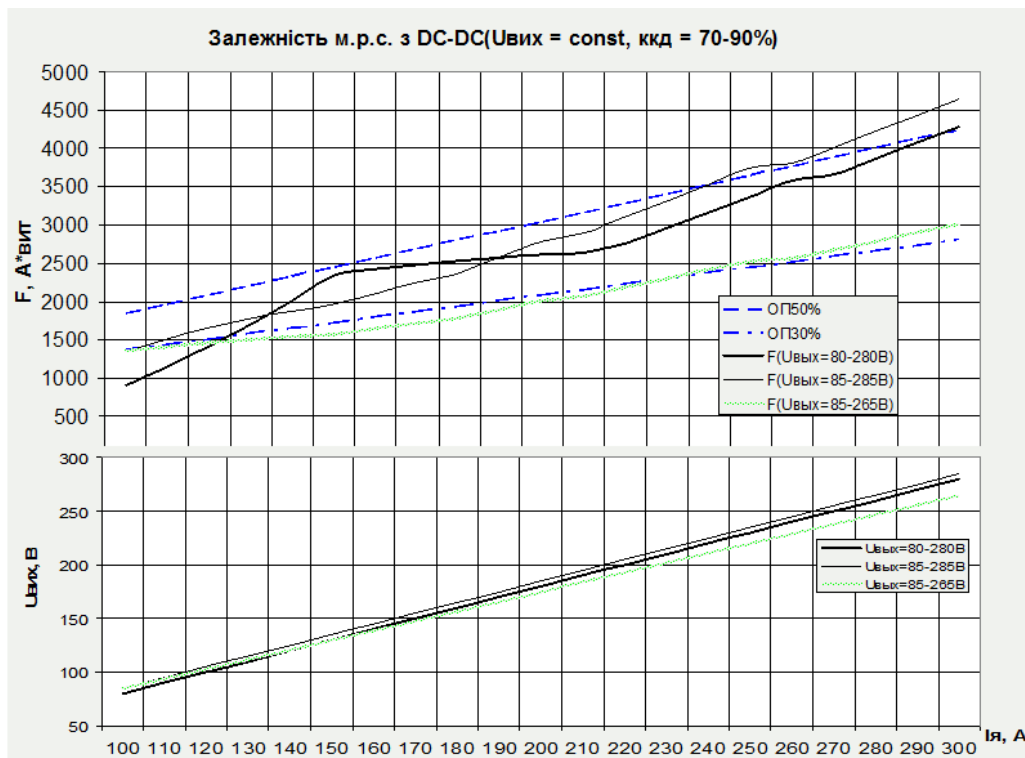


Рис. 5 Залежність м.р.с. від струму якоря з DC-DC ($U_{\text{dc(out)}} = 80-285\text{В}$)

Характеристики $F (A^*вит)$ для різних ступенів ослаблення поля без DC-DC перетворювача, а також значення $F (A^*вит)$ з DC-DC з урахуванням фіксованої вихідної напруги DC-DC представлені на рис. 6.

Слід зазначити, що величина вихідної напруги, навіть при не суттєвій зміні, досить сильно впливає на результуючу магнітно-рухому силу F , і, як наслідок, степінь ослаблення поля двигуна. Для коректної роботи системи ослаблення поля необхідно задаватися (за певним законом) $U_{dc}(out)$ у відповідності до струму якоря. Система керування повинна реагувати на зміну струму в якорі двигуна для підтримання ослаблення поля двигуна в заданих межах.

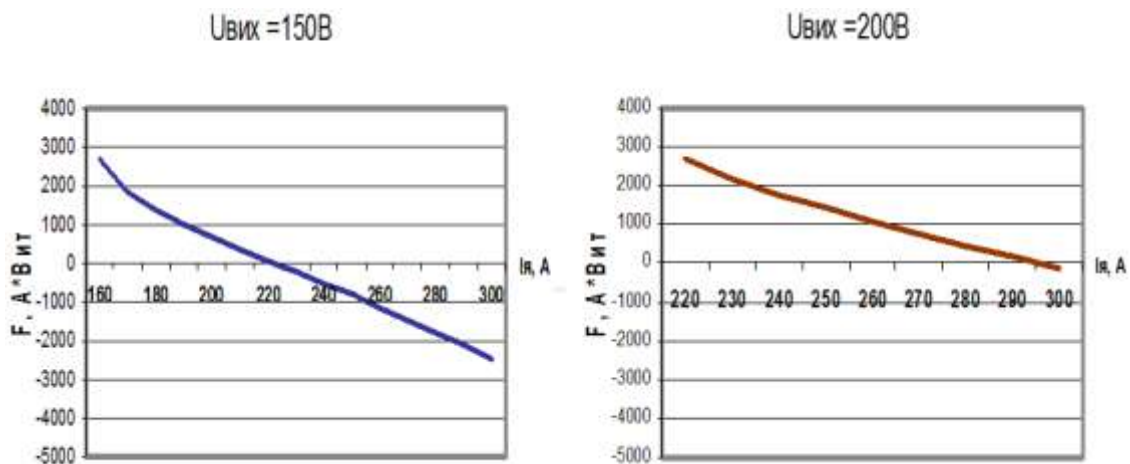


Рис. 6 Залежність м.р.с. з DC-DC ($U_{dc}(out) = const$)

Графіки на рис. 6, в своїй більшості, є тільки теоретичними, оскільки значна частина кривої F знаходиться в області, де $U_{dc}(in)$ менше 2-3В, що є не сумісним з роботою напівпровідникових приладів DC-DC перетворювача.

Література:

1. Корягина Е.Е., Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. Учебник для техникумов городского транспорта. – М.: Транспорт, 1982. – 296с.
2. Ефремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование) Ч. 2: учеб. пособие для вузов. –М.: Высшая школа, 1981. – 248с.
3. Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. – М.: Транспорт, 1986. – 229с.

4. Андрійченко В.П., Закурдай С.О. Електричне обладнання рухомого складу міського електричного транспорту. Регулювання тягових електричних двигунів рухомого складу в режимі тяги. Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.092 202 - Електричний транспорт. – Харків: ХНАМГ, 2006.- 81с.

5. Евгений Звонарев. Микросхемы для DC/DC-преобразователей от STMicroelectronics. Информационно-технический журнал для разработчиков электроники. 2010, №6.