

УДК 624.429.3:621.313

ПЕТРЕНКО О.М., к.т.н., доцент кафедри електричного транспорту (Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова),  
 ЛЮБАРСЬКИЙ Б.Г., д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

## Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи

*Визначення ефективності приводу рухомого складу безпосередньо зв'язано з його проектуванням. У роботі запропоновано проводити його по наступних етапах: визначення основних параметрів для проектування електрорухомого складу та проектування альтернативних конструкцій тягових приводів.*

*Найбільш поширеною структурною схемою для живлення тягових двигунів змінного струму є напівпровідникові перетворювачі з проміжним контуром постійної напруги, але в останні часи запропоновані схеми електрорухомого складу з застосуванням трансформатора підвищеної частоти.*

*Встановлено, що вхідний перетворювач і вихідний розділені між собою. Режими роботи першого визначаються контактною тяговою мережею, а другого – тягового – рухом електрорухомого складу на ділянці колії та режимами роботи тягового двигуна. Тому при дослідженні ефективності роботи тягового приводу електрорухомого складу нами розглядається тільки вихідний перетворювач.*

**Ключові слова:** ефективність електрорухомого складу, основні характеристики електрорухомого складу, тяговий двигун, структурна схема тягового приводу.

### Актуальність роботи

Основним напрямом розвитку теорії проектування електрорухомого складу (ЕРС) є зниження витрат його життєвого циклу. Витрати життєвого циклу складаються з: витрат на розробку рухомого складу (розробку нормативно-технічної документації, випробування, сертифікацію і освоєння у виробництві), витрат на виробництво, витрат на експлуатацію, витрат на утилізацію.

Зважаючи на тривалий цикл експлуатації ЕРС, витрати на його розробку, виробництво і утилізацію незрівнянно нижчі за витрати на експлуатацію. Тому сучасні тенденції розвитку ЕРС базуються на зниженні витрат на їх експлуатацію [1].

Витрати на експлуатацію складаються з витрат на енергоресурси, необхідні для роботи ЕРС, і витрат на обслуговування та ремонт.

Перший напрям, пов'язаний зі зниженням витрати енергії при русі ЕРС, приводить розробників до наступних завдань: підвищення ККД тягового приводу (ТП) в цілому і його складових – тягових двигунів (ТД), напівпровідникового перетворювача (НП), механічної частини тягового приводу, допоміжних систем – в усіх режимах роботи; впровадження систем рекуперації енергії, що дозволяє повертати частину накопиченої рухомим складом кінетичної енергії руху до мережі,

шляхом перетворення її в електричну енергію при гальмуванні рухомого складу; введення до структури ТП елементів, що дозволяють накопичувати зайву енергію при гальмуванні та віддавати її при розгоні ЕРС – накопичувачів енергії; розробка систем раціонального ведення рухомого складу; розробка і вдосконалення допоміжних систем рухомого складу в наступних напрямках: системи, що дозволяють змінювати режими роботи ЕРС шляхом зниження обмежень на швидкість руху ЕРС (системи нахилу кузова), підвищення ККД допоміжних пристроїв.

Усі існуючі ТД, вживані на ЕРС, мають досить високий ККД в номінальних і близьких до нього режимах роботи – близько 0,91...0,95, проте елементи ТП, що забезпечують їх роботу при пуску або в режимах руху на високих швидкостях, можуть значно понизити його, зважаючи на застосування резисторів для регулювання струму і напруги в ТД. Тому в сучасному рухомому складі регулювання напруги або струму в ТД здійснюється виключно із застосуванням напівпровідникових перетворювачів [1].

Інший напрям визначається зниженням витрат на обслуговування і ремонт ЕРС. Найбільш вимогливим до обслуговування є щітково-колекторний вузол. Тому застосування безконтактних (безколекторних) ТД – основний шлях розвитку цього напрямку. Найбільше поширення в тязі здобув привід на основі асинхронних електромеханічних перетворювачів.

Також стимулюючим чинником в цьому напрямі є

зростання рівня витрат на обслуговуючий персонал як в ряді європейських країн, так і на ділянках залізниць, що знаходяться на значному видаленні від основних центрів промисловості та культури в Росії, Китаї та інших країнах Азії, де створення конструкцій ТД з мінімальними витратами на технічне обслуговування стає нині вельми актуальним.

**Мета роботи** - встановлення основних положень і підходів до визначення ефективності електрорухомого складу.

### **Матеріал і результати досліджень**

Сучасні ТД є електричними машинами, що створені на основі оптимальних підходів до проектування, основи яких розроблені в [1 - 6]. Вони характеризуються значними електромагнітними навантаженнями, високим використанням матеріалів, напруженим тепловим станом, впливом динамічних навантажень з боку механічного приводу і рейкового шляху, і так далі [7 - 12].

Згідно до загального визначення критерію ефективності: критерій ефективності є правилом, що дозволяє зіставити стратегії, які характеризуються різною мірою досягнення мети, та здійснити спрямований вибір стратегій з безлічі допустимих [13]. В роботі [14] зазначено, що визначення ефективності приводу рухомого складу безпосередньо зв'язано з проектуванням ЕРС та запропоновано проводити його по наступних етапах.

Перший етап – визначення основних параметрів для проектування ЕРС. На цьому етапі необхідно виробити основні вимоги, що пред'являються до проектного ЕРС: його масу, розрахункову швидкість руху, конструкційну швидкість, з якою може рухатися ЕРС і географічно-кліматичні умови його застосування.

У практиці проектування ЕРС для залізниць ЄС на цьому етапі проводиться попереднє вирішення тягової задачі руху ЕРС по ділянці колії. За результатами визначається необхідна форма тягової характеристики, яка забезпечує заданий час руху ЕРС на усій ділянці шляху. Оскільки вітчизняний ЕРС передбачається експлуатувати на вже побудованих ділянках залізниць на яких здійснюється рух [14 - 17], то такий підхід стає заважким. Тому на першому етапі пропонується виробити концепцію тяги: мотор-вагонна або локомотивна, визначиться з осьовою характеристикою або составністю – числом обмоток осей. Далі визначити основні швидкісні характеристики: розрахункова швидкість руху, конструкційна швидкість руху. Потім визначити прискорення: при зрушенні з місця, при розрахунковій швидкості руху, залишкове прискорення при конструкційній швидкості. На цьому етапі раціонально визначити попередню тягову характеристику ЕРС.

Так само необхідно вибрати рід струму ЕРС. Цей вибір визначить надалі обмеження з обрання структури

ТП ЕРС. Вибір цього параметра доцільно чинити з урахуванням географії використання ЕРС.

Другий етап – оптимальне проектування альтернативних типів ТП ЕРС по визначених в на першому етапі характеристиках. Залежно від роду струму ЕРС, можливий певний набір типів ТП що реалізують необхідні характеристики ЕРС при застосуванні різних типів електромеханічних перетворювачів енергії (тягових двигунів).

Спершу, до середини 60-х років ХХ сторіччя, в тяговому електроприводі переважно використовувалися колекторні двигуни постійного струму послідовного збудження, регулювання їх режимів роботи на ЕРС змінного струму здійснювалося шляхом зміни коефіцієнта трансформації тягового трансформатора, а на ЕРС постійного струму – використанням контактно-реостатної системи управління [10].

Згодом, з появою силових напівпровідникових приладів почалося використання колекторних двигунів пульсуючого струму, що живляться на ЕРС змінного струму від керованих випрямлячів з фазовим регулюванням, а на ЕРС постійного струму – від імпульсних регуляторів постійного струму. Проте наявність щітково-колекторного вузла і підвищення вимог до нього, зважаючи на живлення його від напівпровідникових перетворювачів, привели до масового витіснення колекторних двигунів постійного струму з тяги.

Можливі різні реалізації структурних схем ЕРС. Так, наприклад, для швидкісного електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами можлива реалізація ТП за структурною схемою: трансформатор – 4qs перетворювач – ланка постійної напруги – автономний інвертор напруги – асинхронний тяговий двигун – тяговий привід 3-го класу. Проте за наданих умов можлива реалізація й іншої структурної схеми: 4qs перетворювач – ланка постійного струму – автономний інвертор підвищеної частоти – імпульсний трансформатор – 4qs перетворювач постійного струму – автономний інвертор – асинхронний тяговий двигун – безредукторний тяговий привід.

Проте останнім часом для реалізації розглянутих вище напрямів розвитку ЕРС відмічений наступний основний напрям розвитку [1] - застосування для живлення ТД НП з проміжним контуром постійної напруги (ланкою постійної напруги), який представлений на рис. 1.

В якості вхідного перетворювача для ЕРС змінного струму використовується трансформатор спільно з 4 – qs перетворювачем, для ЕРС постійного струму – імпульсний регулятор напруги, а в ЕРС подвійного живлення – спільно обидва наведені вище рішення. Мета вхідного перетворювача – перетворення вхідної напруги в стабілізовану постійну напругу в проміжному контурі.

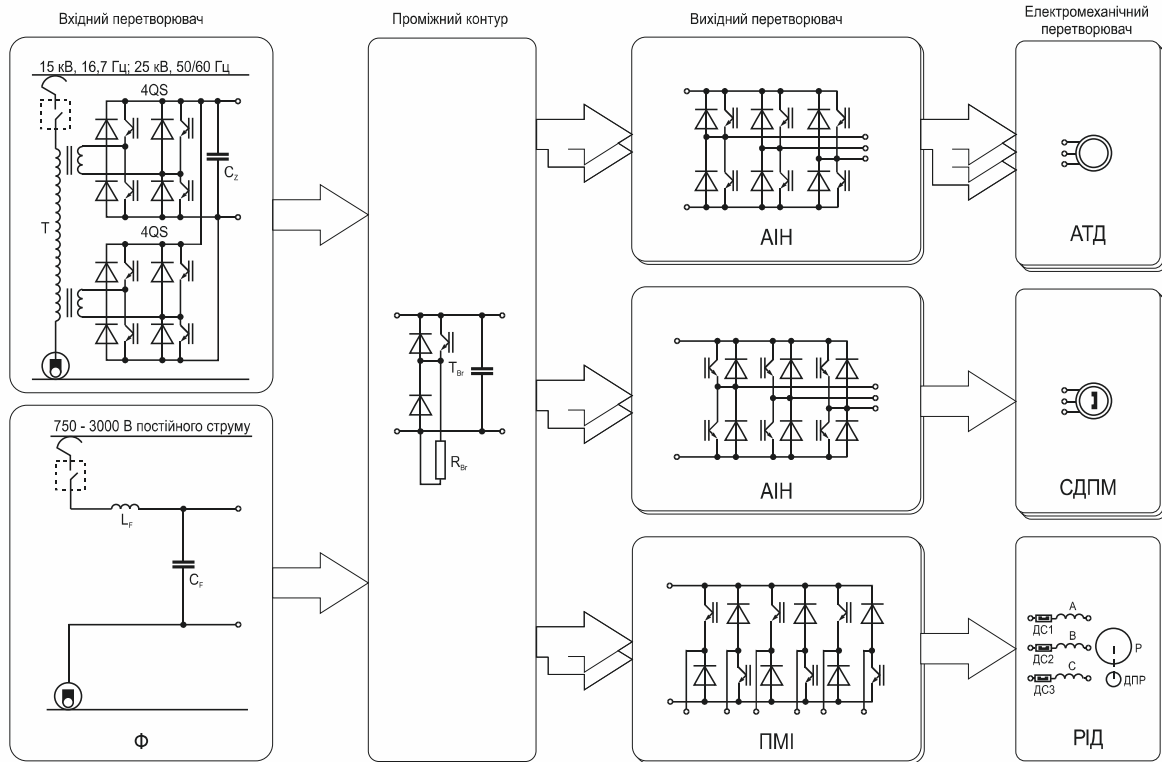


Рис. 1. Перспективна система електроμηχανічного перетворення енергії ЕРС

Проміжний контур є системою пасивних і активних фільтрів, що забезпечують електромагнітну сумісність системи в цілому. У ряді конструкцій в проміжний контур введений дільник напруги, що дозволяє послідовно включати декілька вихідних НП.

Компанія Siemens, кілька років тому, начала роботи із створення прямого перетворювача, що підключається безпосередньо до напруги контактної мережі 3 кВ постійного струму із застосуванням напівпровідникових приладів із замикаючою здатністю 6,5 кВ. Перший дослідний зразок тягового перетворювача на базі таких

приладів був введений в експлуатацію в 1998 р. на електропоїздах залізниць Іспанії (RENFE).

У роботі [20 - 24] розглянуто структури силових кіл ЕРС подвійного живлення з застосуванням трансформатора підвищеної частоти.

Розроблений варіант функціональної схеми, показаний на рис. 2. На базі цієї схеми отримано три альтернативні структури із застосуванням трансформаторів: трифазних, багатообмоткового однофазного та двообмоткових однофазних.

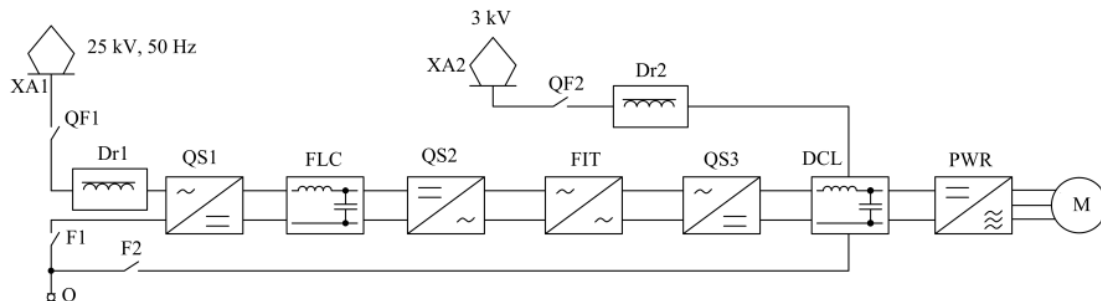


Рис. 2. Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з проміжним трансформатором підвищеної частоти:

QS1 – блок високовольтних випрямлячів, QS2 – блок високовольтних інверторів підвищеної частоти, QS3 – блок низьковольтних випрямлячів, QF1 – швидкодіючий (повітряний) вимикач змінного струму, QF2 – швидкодіючий вимикач постійного струму, F1 – роз'єднувач змінного струму, F2 – роз'єднувач постійного струму, Dr1 – дросель-фільтр змінного струму, Dr2 – дросель-фільтр постійного струму, DCL – проміжний контур постійної напруги, XA1 – струмоприймач, PWR – тяговий перетворювач – автономний інвертор напруги, М – асинхронний ТД.

Також в [22] зазначено, що раціональним для залізниць України є поступове впровадження ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом, що дозволяє знизити кількість інвентарного парку локомотивів та збільшити пропускну спроможність за рахунок ліквідації часу на зупинки, які необхідні для зміни локомотивів у випадку використання односистемного ЕРС.

Виконаний аналіз структур силових схем ЕРС подвійного живлення з асинхронним ТП дозволив автору [22] визначити найбільш раціональну структуру – схему «прямого підключення». Проте недоліком такої структури схеми та всіх схем подібної конфігурації залишається підвищений вплив на пристрої колійної автоматики та значна маса ТП.

Вихідний перетворювач є системою живлення і управління ТД. Його тип залежить від типу ТД. Для асинхронного ТД і синхронного ТД зі збудженням від постійних магнітів застосовуються автономні інвертори напруги що реалізують як режим одноразової ШІМ [18], так і режими регулювання з просторово-векторною ШІМ. Для живлення кожної з фаз реактивного індукторного (вентильного) ТД і тягового двигуна з поперечним полем, застосовуються напівмостові інвертори з обмеженням струму у фазі. Живлення асинхронного ТД здійснюється по груповій, в основному, візковій схемі, при якій від одного вихідного НП живляться усі тягові двигуни одного візка (2 або 3). Для інших ТД реалізується індивідуальне живлення, один вихідний НП живить один ТД. Для поліпшення гармонійного складу напруги, асинхронний ТД в режимі одноразової ШІМ [18], низкою авторів пропонується паралельна робота декількох автономних інверторів з чергуванням фаз на ТД [19].

Структура ЕРС доповнюється списком керуючих впливів для кожного з елементів ТП (для автономного інвертора напруги – частота і фаза вихідної напруги, несуча частота).

Розглянуті вище схеми вхідних перетворювачів ЕРС стабілізують напругу на проміжному контурі. Таким чином, вхідний перетворювач і вихідний розділені між собою. Режими роботи першого визначаються контактною тяговою мережею, а другого – тягового – рухом ЕРС на ділянці колії та режимами роботи ТД. Тому при дослідженні ефективності роботи ТП ЕРС нами розглядається тільки вихідний перетворювач.

## Висновки

Визначення ефективності приводу рухомого складу безпосередньо зв'язано з його проектуванням. У роботі запропоновано проводити його по наступним етапам: визначення основних параметрів для проектування електрорухомого складу та проектування альтернативних конструкцій тягових приводів.

Найбільш поширеною структурною схемою для живлення тягових двигунів змінного струму є

напівпровідникові перетворювачі з проміжним контуром постійної напруги, але в останні часи запропоновані схеми електрорухомого складу з застосуванням трансформатора підвищеної частоти.

Встановлено, що вхідний перетворювач і вихідний розділені між собою. Режими роботи першого визначаються контактною тяговою мережею, а другого – тягового – рухом електрорухомого складу на ділянці колії та режимами роботи тягових двигунів. Тому при дослідженні ефективності роботи тягового приводу електрорухомого складу нами розглядається тільки вихідний перетворювач.

## Література

1. Любарский Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014. 368с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов — М.: Энергия, 1980. – 495с.
3. Находкин М.Д. Проектирование тяговых электрических машин [Учебн. пособие для ВУЗов ж.-д. транспорта, Изд. 2, перераб. и дополн.] / М.Д. Находкин – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
4. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст]: монография / Г.К. Гетьман. – Д.: Изд. Днепро. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
5. Общий курс железных дорог / В.Н. Соколов, В.Ф. Жуковский, С.В. Котенкова, А.С. Наумов– М.: УМК МПС Россия, 2002. – 296с.
6. Рябов Е.С. Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком/ Е.С. Рябов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 38. – С. 80–83.
7. Любарский Б.Г. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / Б.Г. Любарский, В.И. Омеляненко, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // Локомотив-информ. – 2008. №1– С. 16–19
8. Омеляненко В.И. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова. // Залізничний транспорт України.– 2008. – №2/1. – С. 26–31.
9. Захаров В.И. Эволюция конструкций тяговых двигателей, выпускаемых ОАО «НПО «НЭВЗ». Современный уровень // Электровозостроение:

- Сб. научн. тр. / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструктор. ин-т электровозостроения (ОАО "ВЭЛНИИ").- 2003.- Т. 45. -С. 109 - 122.
10. Концепция современного тягового привода // Железные дороги мира. – 1999.– № 06. – С. 40–45
  11. Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України [Текст]: монографія Ч. 1. / Г.Г. Басов, С.И. Ясько. – Харків: "Апекс+".–2004. – 240 с.
  12. Басов Г.Г. Разработка типажа современного моторвагонного подвижного состава для украинских железных дорог / Г.Г. Басов, К.П. Мищенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2003. – №48. – С.90 - 91.
  13. Надёжность и эффективность в технике. Справочник / В.С.Авдуевский и др. – М.:Машиностроение. – Т.3 Эффективность технических систем/ под ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова – 328с.
  14. Любарский Б.Г. Концепция выбора типа тягового электропривода современного скоростного подвижного состава / Б.Г.Любарский // Вісник НТУ «ХПИ» – 2010. – № 39 – С.102 - 107.
  15. Могилевкин И. М. Транспорт и коммуникации: прошлое, настоящее, будущее / И. М. Могилевкин. - М.: Наука, 2005. - 357 с.
  16. Walrave M. Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa / M. Walrave, G. Ellwanger // ETR-Eisenbahntechnische Rundschau. - 1995. - № 10. - P. 136 - 142.
  17. Корниенко В.В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В.В. Корниенко, В.И. Омеляненко. - Х.: НТУ "ХПИ", 2007.- 159 с.
  18. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи/ В.С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376с.
  19. Гусевский Ю.И. Двухфазный тяговый электропривод при улучшенной форме питающего напряжения / Ю.И. Гусевский, А.В. Бондаренко// Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 4 (Додаток). – С. 5 - 6.
  20. Муха Андрій Миколайович. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2011, 362 с.
  21. Муха А.М. Уніфікація як критерій порівняльної оцінки структурних схем тягового перетворювача для багатосистемного електровоза / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009 – №29. - С. 71 – 75.
  22. Забарилло Д. А. Повышение эффективности электроподвижного состава двойного питания с тяговым асинхронным приводом. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск 2015. 170 с.
  23. Забарилло Д. О. Принципи побудови силових схем багатосистемних електровозів нового покоління / Д. О. Забарилло // Локомотив-інформ. – Х., 2013. – №8 (86). – С.4 - 12.
  24. Электроподвижной состав двойного питания с асинхронными тяговыми двигателями и высокочастотным трансформатором / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. А. Забарилло, С. Л. Марикуца, О. О. Шевчук, В. С. Крашанюк // Локомотив-інформ. - Х.: Подвижной состав. – 2014. – № 02 (92). – С. 46 - 48.
- А. Н. Петренко, Б. Г. Любарский. Определение эффективности электроподвижного состава. Основные положения и подходы.** Определение эффективности привода подвижного состава непосредственно связано с его проектированием. В работе предложено проводить его по следующим этапам: определение основных параметров для проектирования электроподвижного состава и проектирование альтернативных конструкций тяговых приводов.
- Наиболее распространенной структурной схемой для питания тяговых двигателей переменного тока является применение полупроводниковых преобразователей с промежуточным контуром постоянного напряжения, но в последнее время предложены схемы электроподвижного состава с применением трансформатора повышенной частоты.
- Установлено, что входной и выходной преобразователи разделены между собой. Режимы работы первого определяются контактной тяговой сетью, а второго – тягового – движением электроподвижного состава на участке пути и режимами работы тягового двигателя. Поэтому, при исследовании эффективности работы тягового привода электроподвижного состава, нами рассматривается только выходной преобразователь.
- Ключевые слова:** эффективность электроподвижного состава, основные характеристики электроподвижного состава, тяговый двигатель, структурная схема тягового привода.

**О.М. Petrenko, B.G. Lyubarskiy. The determination of electric rolling stock effectiveness. Basic provisions and approaches.** The determination of rolling stock drive effectiveness is directly connected with its designing. The paper proposes to carry it in the following stages: the determination of the basic parameters for designing electric rolling stock and designing alternative structures of traction drives.

The most common structural scheme to feed AC traction motors is the use of semiconductor converters with DC intermediate circuit, but schemes of electric rolling stock with high frequency transformer have been proposed recently.

It has been found that input and output transducers are separated from each other. Operating modes of the former are determined by the contact traction system, and the ones of the latter - tractive – are determined by the movement of electric rolling stock on the track section and traction engine behavior. That is why, while investigating working efficiency of electric rolling stock traction drive we consider only output converter.

**Key words:** electric rolling stock efficiency, basic characteristics of electric rolling stock, traction motor, a traction drive structural layout.

Рецензент д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ»  
В.Г. Маслієв

*Поступила 01.10.2015г.*

**О. М. Петренко**, к.т.н., доцент кафедри електричного транспорту, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, Харків, Україна, [petersanya2007@mail.ru](mailto:petersanya2007@mail.ru)

**Б. Г. Любарський**, д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, НТУ «ХПІ», Харків, Україна, [lboris19111972@mail.ru](mailto:lboris19111972@mail.ru)

**O.M. Petrenko**, Ph.D., assistant professor of electrical transport, O.M.Beketov National University of Urban Economic, Kharkov, Ukraine, [petersanya2007@mail.ru](mailto:petersanya2007@mail.ru)

**B.G. Lyubarskiy**, Doctor of Engineering, Docent of the Department "Electrical transport and diesel locomotive", NTU "KPI", Kharkov, Ukraine, [lboris19111972@mail.ru](mailto:lboris19111972@mail.ru)