

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

У статті проведений аналіз впливу виду тягового двигуна на потужність тягового статичного перетворювача. Введено поняття модуль тягового перетворювача й отримані основні кількісні співвідношення для тягових перетворювачів з різним числом модулів.

В статье проведен анализ влияния вида тягового двигателя на мощность тягового статического преобразователя. Введено понятие модуль тягового преобразователя и получены основные количественные соотношения для тяговых преобразователей с различным числом модулей.

Analysis of the influence of the type of the traction engine is organized In article on power of the traction steady-state converter. The Incorporated notion module traction converter and are received main quantitative correlations for traction converters with different number of the modules.

Вступ. Проблема створення потужних тягових напівпровідникових перетворювачів для електрорухомого була сформульована як тільки з'явилися (60-ті, 70-ті роки 20 ст.), потужні діоди, а згодом і тиристори. Але з деяких причин, одна з яких – недостатньо високий на той час рівень робочих струмів та напруг потужних силових приладів, не дозволило створити тягові перетворювачі, які б відповідали необхідним масогабаритним, енергетичним показникам і експлуатаційній надійності [1].

При сучасному рівні розвитку потужної напівпровідникової елементної бази стає можливою побудова багатофункціональних уніфікованих тягових перетворювачів для електрорухомого складу (ЕРС).

Яскравими прикладами використання потужних перетворювачів на сучасній елементній базі є швидкісні потяги серій TGV (Франція).

Аналіз літературних джерел. Проблемі побудови тягових перетворювачів на напівпровідниковій елементній базі присвячені роботи [1, 5, 10].

Мета роботи. Дослідити питання вибору потужності тягового перетворювача для багатосистемного ЕРС при експлуатації в різних умовах. Мається на увазі ЕРС, який зможе працювати при різних рівнях напруги у контактній мережі як при постійному так і змінному струмах.

Матеріал і результати дослідження.

Відомо, що тяговий привод ЕРС, до якого входить і статичний перетворювач, повинен забезпечити максимальне можливе зчеплення коліс локомотива з рейками при любых кліматичних умовах і любому стані контактних поверхонь [1, 2].

Тяговий статичний перетворювач призначено для забезпечення живлення тягових двигунів ЕРС. З метою економії напівпровідникових приладів та іншої електротехнічної апаратури прийнято використовувати групову схему підключення тягових двигунів до перетворювача [3]. Так, для живлення 12 тягових двигунів типу НБ-514 (потужність годинного режиму 835 кВт) електровозу ВЛ85 з сумарною потужністю часового режиму 10020 кВт, використовують 6 тягових перетворювачів ВІП-4000УХЛ2, потужністю 4340 кВт [4]. Тобто, коефіцієнт запасу по потужності перетворювача дорівнює

$$k_{\text{зап}} = \frac{4340}{2 \cdot 835} = 2,6$$

і обумовлений переважною здатністю двигунів постійного струму при пуску.

Режим роботи тягового електропривода (до якого входить тяговий двигун та перетворювач), як відомо, визначається умовами експлуатації і залежать, головним чином, від маси поїзда та швидкості його руху. Дослідимо питання вибору потужності тягового перетворювача який призначено для використання на електровозах.

На першому етапі використаємо загально відому методику вибору потужності тягових двигунів електровозів [5].

Номінальну потужність одного тягового двигуна електровозу визначається як:

$$P_N = \frac{F_{\text{кн}} \cdot v_{\text{н}}}{N_{\text{д}}},$$

де $F_{\text{кн}}$ – номінальна сила тяги, Н;

$v_{\text{н}}$ – номінальна швидкість, м/с;

N_d – кількість тягових двигунів на електро-
возі.

Номінальна сила тяги визначається як:

$$F_{кн} = \frac{F_{кр} \cdot E_p}{k_p},$$

де $F_{кр}$ – розрахункова сила тяги, Н;

E_p – коефіцієнт ефективності засобів під-
вищення зчеплення (приймаємо рівним 1,15);

k_p – коефіцієнт перевантаження електрово-
зу за силою тяги (приймаємо рівним 1,1).

При $k_p = 1,1$ $v_H = 1,04 \cdot v_p$.

Орієнтовно можливо прийняти [5]:

$$F_{кр} = 0,95 m_B g (w_B'' + i_p),$$

де m_B – маса вагонів поїзду, т;

w_B'' – питомий основний опір руху вагонів,
Н/кН;

i_p – розрахунковий підйом, ‰.

Тоді, на підставі вище вказаного, сумарна
потужність всіх тягових двигунів електровозу
можливо орієнтовно визначати за наступним
виразом:

$$P_{\Sigma N} = 1,03 m_B g (w_B'' + i_p) \cdot v_p,$$

де v_p – розрахункова швидкість, м/с.

Проаналізуємо вплив швидкості та маси по-
тягів на орієнтовну сумарну потужність елект-
ровозу.

У відповідності до [6] питомий основний
опір руху вантажних вагонів (при швидкості до
120 км/год [5]) при русі по ланковій колії:

– чотирьохосні вагони на роликівих підши-
пниках і рефрижераторні вагони:

$$w_B'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot v + 0,0025 \cdot v^2}{q_B},$$

де v – швидкість для якої проводимо розраху-
нок, км/год;

q_B – навантаження на одну вісь вагона, т.

– восьмиосні вагони на роликівих підши-
пниках

$$w_B'' = 0,7 + \frac{6 + 0,038 \cdot v + 0,0021 \cdot v^2}{q_B}.$$

При русі вантажних вагонів по безстиківій
колії:

– чотирьохосні вагони на роликівих підши-
пниках і рефрижераторні вагони

$$w_B'' = 0,7 + \frac{3 + 0,09 \cdot v + 0,002 \cdot v^2}{q_B};$$

– восьмиосні вагони на роликівих підши-
пниках

$$w_B'' = 0,7 + \frac{6 + 0,026 \cdot v + 0,0017 \cdot v^2}{q_B}.$$

У відповідності до [6] питомий основний
опір руху пасажирських вагонів (при швидкості
до 160 км/год) при русі по ланковій колії:

$$w_B'' = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot v + 0,003 \cdot v^2}{q_B}.$$

При русі по безстиківій колії:

$$w_B'' = 0,7 + \frac{8 + 0,16 \cdot v + 0,0023 \cdot v^2}{q_B}.$$

Аналізуючи технічні характеристики вагон-
ного парку [7,8] визначимо навантаження на
вісь основних типів вагонів, що експлуатують-
ся на залізницях України. Результати предста-
вимо у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Навантаження на вісь основних типів вагонів

Вид вагону	Кількість осей	Маса (разом з тарою), т	Навантаження на вісь, т
Піввагон	4	93,9	23,475
Вагон критий	4	94	23,5
Платформа	4	100	25
Цистерна	4	92	23
	8	176	22
Хопер	4	100	25
Самоскид	4	93,7	23,425
Вагони паса- жирські *	4	60,24	15,06
	4	55,18	13,795
	4	58,98	14,745
	4	60,98	15,245

* – приймаємо вагу одного пасажира рівною 80 кг.

При дослідженнях впливу швидкості та маси
потягів на орієнтовну сумарну потужність елект-
ровозу задаємо розрахунковий підйом в ме-
жах від 4 до 12 ‰ [5].

Представимо графічно залежності необхід-
ної потужності електровозу від ваги вагонів
 $P_{\Sigma N} = f(m_B)$, при різних розрахункових підйо-
мах (рис. 1) $i_p = \text{const}$.

Аналогічно, можливо отримати залежності
для інших видів вагонів.

За допомогою розглянутої методики є доці-
льним визначити з якою швидкістю, та з поїз-
дом якої ваги може рухатися електровоз по за-

даному розрахунковому підйому. Потім на підставі отриманих залежностей, в залежності від профілю шляхів та необхідної швидкості, визначитись якої потужності необхідно використовувати електровоз (перетворювач). Електровози що, експлуатуються на залізницях України та інших держав СНД, мають потужність годинного режиму 6000...10000 кВт.

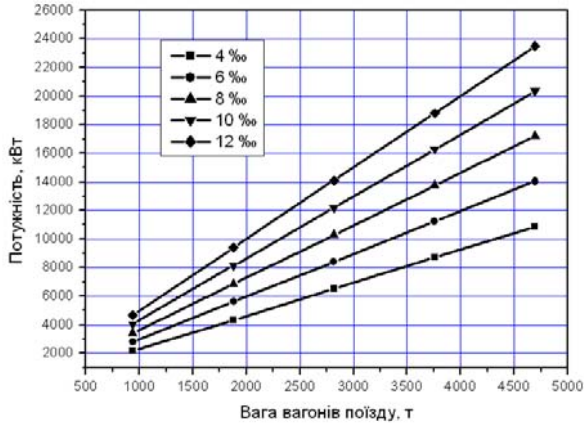


Рис. 1. Поїзд складається з піввагонів з $q_0 = 23,475$ т при русі по ланковій колії

Використовуючи отримані раніш співвідношення побудуємо графічні залежності $v = f(m_B)$ при умовах $i_p = \text{const}$, $P_{\Sigma N} = \text{const}$ для діапазону потужностей електровозів від 5000 кВт до 11000 кВт. Результати представлені на рис. 2.

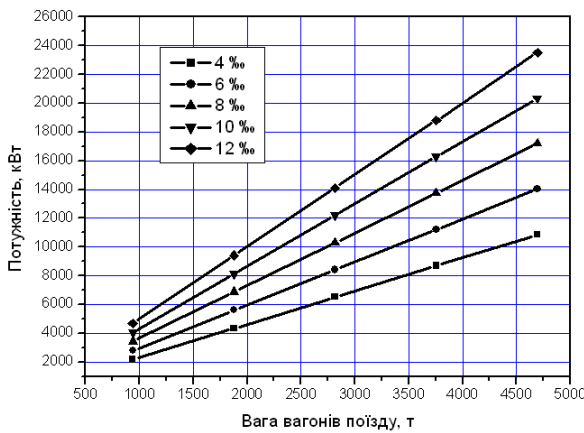


Рис. 2. Залежності $v = f(m_B)$ для потужності 5000 кВт (поїзд складається з 4-х осних хоперів з $q_0 = 25$ т при русі по ланковій колії)

Аналіз представлених на рис. 2 характеристик показує, що доцільно розглядати область сімейства характерники з діапазоном розрахункового підйому від 4 до 12 ‰, при зміні потужності від 5000 кВт до 11000 кВт з різними типами вагонів. На рис. 3 представлені такі залежності.

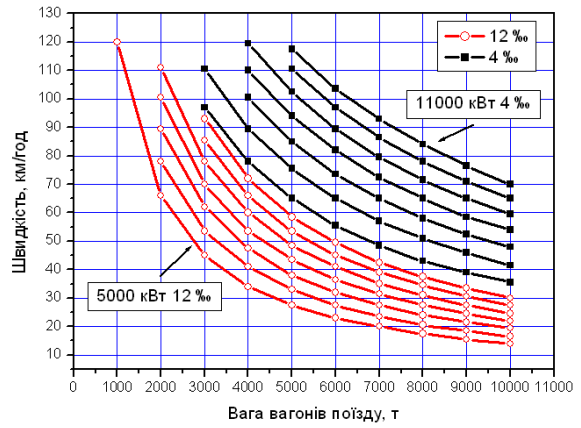


Рис. 3. Залежності $v = f(m_B)$ для потужності електровозу від 5000 кВт до 11000 кВт (поїзд складається з хоперів з $q_B = 25$ т при русі по ланковій колії)

На підставі представлених на рис. 3 сімейства характеристик побудуємо зону швидкостей поїзду, який складається з різної кількості вагонів-хоперів та цистерн, яку можуть реалізувати електровози потужністю від 5000 кВт до 11000 кВт, з діапазоном розрахункового підйому від 4 до 12 ‰. Ця зона (рис. 4) отримана з граничних характеристик сімейства залежностей $v = f(m_B)$.

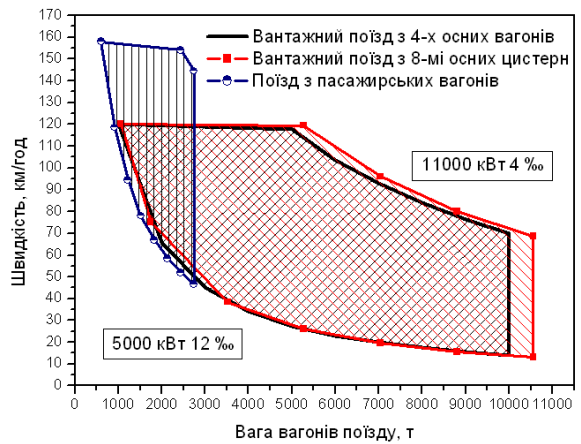


Рис. 4. Зона швидкостей пасажирського та вантажного поїзду різної ваги з електровозами різної потужності

Також на рис. 4 зображена аналогічна зона для поїзду сформованого з пасажирських вагонів, який рухається з електровозами потужністю від 5000 кВт до 11000 кВт.

Аналіз представлених на рис. 4 зон швидкостей ще раз підтверджує відомий факт – вантажно-пасажирські електровози доцільно будувати тільки при умовах перевезення легковагих вантажних поїздів (до 3000 т).

Представлений аналіз лише дозволив визна-

чити взаємний зв'язок потужності силового агрегату електровозу та умов його експлуатації, використовуючи загальновідомі співвідношення.

На другому етапі досліджень по визначенню потужності тягового перетворювача введемо поняття силовий модуль.

Модуль – частина тягового статичного перетворювача, яка по потужності відповідає певній кількості тягових двигунів.

Введемо наступну класифікацію модулів, яка враховує співвідношення «кількість двигунів на один модуль статичного перетворювача» (табл. 2).

Таблиця 2

Класифікація силових модулів

Класифікація модуля	Кількість тягових двигунів на один модуль статичного перетворювача
M1	1
M2	2
M3	3
M4	4
M6	6

Як відомо, останнім часом на електровозах, як пасажирських так и вантажних, кожна з осей має свій тяговий двигун. Це забезпечує можливість будувати потужні електровози з малою кількістю осей. На практиці використовують кількість осей кратну двом (на один візок), або трьом.

Односекційні електровози традиційно виконують у 4-х вісному, або 6-ти вісному виконанні, виходячи з цього на 4-х вісному електровозі можливо використовувати модулі M1, M2, M4, а на 6-ти вісному: M1, M2, M3, M6. Тобто, тяговий статичний напівпровідниковий перетворювач 4-х вісного електровозу може складатися з 4-х модулів M1, або 2-х модулів M2, або одного M4. Аналогічно для 6-ти вісного електровозу: 6 модулів M1, 3 модуля M2, 2 модуля M3 або оди модуль M6.

Задаючись значеннями потужностей тягового двигуна в діапазоні від 900 до 1800 кВт та приймаючи односекційний електровоз 4-х або 6-ти вісним, побудуємо залежність:

$$P_{\Sigma N} = f(P_{\text{дв}}) \text{ при } N_{\text{д}} = \text{const},$$

де $N_{\text{д}}$ – кількість тягових двигунів (осей),

$P_{\text{дв}}$ – потужність тягового двигуну.

На рис. 5 представлена отримана залежність, де представлені дві зони, які відповідають 4-х вісному та 6-ти вісному односекційному електровозу.

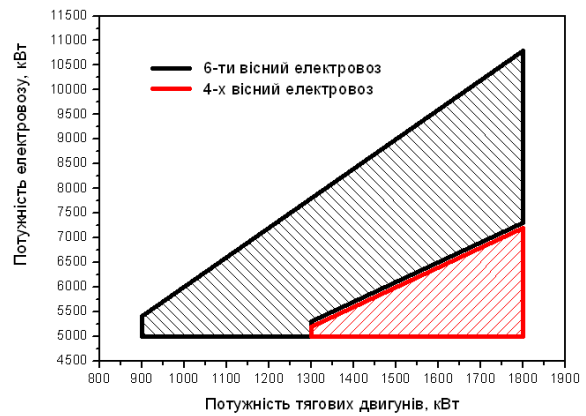


Рис. 5. Залежності $P_{\Sigma N} = f(P_{\text{дв}})$ для потужності тягового двигуна від 900 кВт до 1800 кВт

Використовуючи отримані залежності та співвідношення визначимо необхідну потужність модулів при різних видах тягових двигунів.

У теперішній час є можливість створити колекторні тягові двигуни пульсуючого струму потужністю до 1300 кВт [9], що у відповідності до рисунку 5 обмежує області використання колекторних тягових двигунів тільки на 6-ти вісних односекційних електровозах. Максимальну потужність електровозу (рис. 5) буде дорівнювати 7800 кВт. Приймаючи коефіцієнт перевантажувальної здатності колекторної електричної машини рівним $k_{\text{пзд}} = 1,5 \dots 2,0$ [10], та враховуючи ще 30 % запасу по потужності перетворювача (див. тяговий перетворювач ВИП-4000УХЛ2 на початку), отримаємо такий коефіцієнт запасу по потужності перетворювача:

$$k_{\text{зпп}} = k_{\text{пзд}} (1 + 0,3) = 1,3 \cdot k_{\text{пзд}}.$$

Потужність модуля тягового перетворювача визначаємо за виразом:

$$P_{\text{MN}} = (1,3 \cdot k_{\text{пзд}} \cdot P_{\text{дв}}) \cdot N_{\text{д}}.$$

Тоді потужність тягового перетворювача буде визначатися за наступним виразом:

$$P_{\text{тп}} = P_{\text{MN}} \cdot K_{\text{м}},$$

де $K_{\text{м}}$ – кількість силових модулів у складі тягового перетворювача.

У табл. 3 представлено розрахунок потужності силових модулів тягового перетворювача для 6-ти вісного електровозу з колекторними тяговими двигунами постійного струму потужністю 1300 кВт.

У порівнянні з електричними машинами постійного струму потужність асинхронних і вентильних (синхронних) тягових двигунів не об-

межуються щіточно-колекторним вузлом, тому 4-х вісні електровози, з потужністю кожного з двигунів понад 1300 кВт, доцільно будувати з асинхронними або вентильними тяговими двигунами (далі тягові двигуни змінного струму).

Таблиця 3

Потужність силових модулів для електровозу з тяговими колекторними двигунами постійного струму

Модуль	P_{MN} , кВт	K_M	P_{TP} , кВт
М1 ($N_D = 1$)	3380	6	20280
М2 ($N_D = 2$)	6760	3	
М3 ($N_D = 3$)	10140	2	
М6 ($N_D = 6$)	20280	1	

Коефіцієнт перевантажувальної здатності тягових асинхронної з короткозамкненим ротором та синхронної електричних машин відповідно дорівнюють 0,7...1,8 та 2,0 [10].

Для порівняння потужностей силових модулів для електровозів з двигунами постійного (пульсуючого) струму та змінного струму, доцільно ввести поняття питома потужність модуля і яка визначається як відношення потужності модуля тягового перетворювача до потужності одного тягового двигуна, тобто:

$$\Delta p_{MN} = \frac{P_{MN}}{P_{ДВ}} = \frac{(1,3 \cdot k_{ПЗД} \cdot P_{ДВ}) \cdot N_D}{P_{ДВ}} = 1,3 \cdot k_{ПЗД} \cdot N_D.$$

Як бачимо з отриманого виразу питома потужність залежить від перевантажувальної здатності тягового двигуна та кількості тягових двигунів на один модуль.

Представимо у вигляді таблиці (табл. 4) розрахунок питомої потужності силових модулів з тяговими двигунами змінного та постійного струмів.

Зменшення питомої потужності силових модулів при використанні асинхронних тягових двигунів змінного струму по відношенню до тягових двигунів синхронних та постійного струму представлено у табл. 5. Розрахунок проведено за виразом:

$$\Delta p_{MN} \% = \frac{\Delta p_{MN} ДПС - \Delta p_{MN} АД}{\Delta p_{MN} ДПС} \cdot 100\%.$$

Таблиця 4

Питома потужність силових модулів з тяговими двигунами змінного та постійного струмів

Модуль	Вид тягового двигуна		
	Постійного струму $k_{ПЗД} = 2,0$	Асинхронний с КЗР $k_{ПЗД} = 1,8$	Синхронний $k_{ПЗД} = 2,0$
М1 ($N_D = 1$)	2,6	2,3	2,6
М2 ($N_D = 2$)	5,2	4,7	5,2
М3 ($N_D = 3$)	7,8	7,0	7,8
М4 ($N_D = 4$)	10,4	9,4	10,4
М6 ($N_D = 6$)	15,6	14,0	15,6

Варіант порівняння питомої потужності синхронних тягових двигунів з двигунами постійного струму не розглядаємо, оскільки виконується рівність (див. табл. 4):

$$\Delta p_{MN} ДПС = \Delta p_{MN} АД.$$

Таблиця 5

Співвідношення питомих потужностей силових модулів з тяговими двигунами змінного та постійного струмів

Модуль	$\Delta p_{MN} ДПС$	$\Delta p_{MN} АД$	$\Delta p_{MN} \%$, %
М1 ($N = 1$)	2,6	2,3	11,54
М2 ($N = 2$)	5,2	4,7	9,62
М3 ($N = 3$)	7,8	7,0	10,26
М4 ($N = 4$)	10,4	9,4	9,62
М6 ($N = 6$)	15,6	14,0	10,26

Аналіз представлених у табл. 5 результатів дозволяє зробити наступні висновки.

Для 4-х вісного електровозу з асинхронними тяговими двигунами, у порівнянні з використанням двигунів постійного струму або синхронних, доцільно використовувати модулі статичного напівпровідникового перетворювача у такому порядку: М1, М2 або М4.

Аналогічно для 6-ти вісного електровозу з асинхронними тяговими двигунами доцільно використовувати модулі статичного напівпровідникового перетворювача у такому порядку: М1, М3 або М6, М2.

Найбільший ефект, відносно до зменшення потужності модулю, при використанні асинхронних тягових двигунів дає комплектування тягового перетворювача з модулів М1 (відносне зменшення питомої потужності складає 11,54 %).

Крім того використання модулів М1 є привабливим з точки зору надійності тягового приводу електровозу у цілому, оскільки вихід з ладу одного модуля М1 призведе до виключення з роботи тільки одного тягового двигуна. Використання ж модулів М4 (для 4-х вісного електровозу) або М6 (для 6-ти вісного електровозу) є недоцільним з точки зору надійності тягового приводу у цілому по зрозумілих причинах.

Слід зазначити, що використання того, або іншого типу модуля у складі статичного перетворювача визначається не тільки потужністю, але й масогабаритними показниками модуля. Може статися таке, що розташувати у доступному об'ємі 6-ти вісного односекційного електровозу шести модулів М1 неможливо, а трьох модулів М2 або двох М3 або ж одного М6 доступний простір кузова електровозу дозволяє.

Але порушені вище питання надійності та масогабаритних показників модулів різних типів є тема окремих досліджень.

Загальні висновки. Представлений порівняльний аналіз питомих потужностей силових модулів тягових перетворювачів електровозів з двигунами постійного (пульсуючого) та змінного струму (однакової потужності) вказує, що будувати електровози з тяговими двигунами змінного струму (асинхронні з короткозамкненим ротором) доцільно не тільки тому, що останні характеризуються більш високими експлуатаційними показниками, а крім того, для живлення цих двигунів потрібні перетворювачі меншої потужності по відношенню

до одного тягового двигуна.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Солодунов А. М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. / А. М. Солодунов, Ю. М. Иньков, Г. Н. Коваливкер, В.В. Литовченко. / Под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.
2. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
3. Дубровский З. М. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. / З. М. Дубровский В. И. Попов, Б. А. Тушканов. – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
4. Тушканов Б. А. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации. / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова, В. П. Ярош и др. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
5. Ротанов Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом. / Н. А. Ротанов, Д. Д. Захарченко, А. В. Плакс / Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
6. Гребенюк П. Т. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долгунов, О. А. Некрасов, А. Л. Лисицын, П. П. Стромский. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
7. Цыганкова В. И. Вагоны пассажирские и грузовые колеи 1520 мм / В. И. Цыганкова, Т. Н. Зайцева. – М.: Желдориздат, 2004. – 192 с.
8. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СРСР. – М.: Транспорт, 1989. – 176 с.
9. Захарченко Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968. – 296 с.
10. Винокуров В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта. / Д. А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.

Надійшла до редколегії 23.11.07.