

УДК 629.423.31-047.37

**ВПЛИВ ДИНАМІЧНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ НА ШВИДКІСТЬ ЗРОСТАННЯ СТРУМУ  
КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ**

Канд. техн. наук О.О. Карзова

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ НА СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ТОКА  
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Канд. техн. наук О.А. Карзова

**INFLUENCE OF DYNAMIC INDUCTANCE ON THE RISING OF SHORT-CIRCUIT CURRENT  
IN THE CIRCUITS OF ELECTRIC ROLLING STOCK DC**

Cand. of techn. sciences O. Karzova

*У статті досліджено питання впливу динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму на швидкість зростання струму при короткому замиканні з подальшим використанням результатів для визначення величини уставки пристроїв захисту на сучасній елементній базі, що призначені для захисту електрообладнання від струмів коротких замикань.*

**Ключові слова:** коротке замикання, динамічна індуктивність, електрорухомий склад, швидкість зростання струму, тягові електродвигуни.

*В статье исследованы вопросы влияния динамической индуктивности обмоток возбуждения тяговых электродвигателей электроподвижного состава постоянного тока на скорость нарастания тока при коротком замыкании с последующим использованием результатов для*

определения величины уставки устройств защиты на современной элементной базе, которые предназначены для защиты электрооборудования от токов коротких замыканий.

**Ключевые слова:** короткое замыкание, динамическая индуктивность, электроподвижной состав, скорость нарастания тока, тяговые электродвигатели.

*This article investigates the impact of dynamic inductance of excitation winding of electric traction motors of direct current on the rate of increase in current at short circuit and then use the results to determine the setting value of protection devices on modern hardware components that are designed to protect electrical equipment from short circuits. In general, under the dynamic inductance of winding main poles traction motors of direct current electric composition refers to the inductance of the coil based on the dynamics of change in the mode of excitation current short circuit. In the article used mathematical models taking into account the action of the dynamic inductance and without it and did the research short circuit mode. Using the models obtained curves of short circuit current of time. The time at which the determined rate of change of current is taken from the beginning of 0.0001 sec. with a short circuit as the response time of modern protection devices. These results show the need to consider when establishing protective equipment to protect power circuits electric composition of short circuits based microprocessor influence of the dynamic inductance of excitation windings.*

**Keywords:** short circuit, the dynamic inductance, of electric composition, rate of rise of current, traction motors.

**Вступ.** Виникнення режиму короткого замикання (КЗ) в силових колах електрорухомого складу (ЕРС) приводить до значних пошкоджень та виходу з ладу електрообладнання, якщо захисні пристрої не спрацюють достатньо швидко і чітко. Тому поглиблені дослідження вказаного режиму з метою використання найновішої елементної бази для вдосконалення захисних пристроїв є завжди актуальними. Дослідження в даній статті відносяться до галузі тягових електричних машин постійного струму електрорухомого складу.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** При налагодженні пристроїв захисту на сучасній мікропроцесорній елементній базі для захисту електрообладнання електрорухомого складу (ЕРС) від аварійних режимів (наприклад, короткого замикання або перевантаження) необхідно знати величину уставки, тобто мінімальне значення контрольованої величини, при якому почне спрацьовувати пристрій захисту. Такі пристрої мають змогу реагувати не тільки на зміну величини аварійного струму, а й на зміну швидкості його зростання на самому початку цього процесу [1, 2].

При розгляданні можливості захисту за допомогою вказаних пристроїв електрообладнання від короткого замикання (КЗ) необхідно у вигляді уставки визначити мінімальне

значення швидкості зростання струму КЗ ( $di_k/dt$ ) з урахуванням різних можливих точок його виникнення в силовому колі, різних схем з'єднання тягових електродвигунів (ТЕД) та різних зовнішніх і внутрішніх впливів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму за допомогою пристроїв захисту, що виконані на сучасній елементній базі, висвітлені в наступних роботах [3-5].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою даної роботи є проведення дослідження для визначення впливу динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму на швидкість зростання струму при короткому замиканні. Для цього необхідно створити математичну модель, яка б враховувала вплив динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів, та з її допомогою дослідити режим короткого замикання.

**Основна частина дослідження.** Для дослідження впливу динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів  $L_{дин}$  на  $di_k/dt$  взято для прикладу електровоз постійного струму ДЕ1 при послідовному з'єднанні його ТЕД (ЕД-141У1) та всіх можливих точках виникнення короткого замикання в його силовому колі [6] (рис. 1).

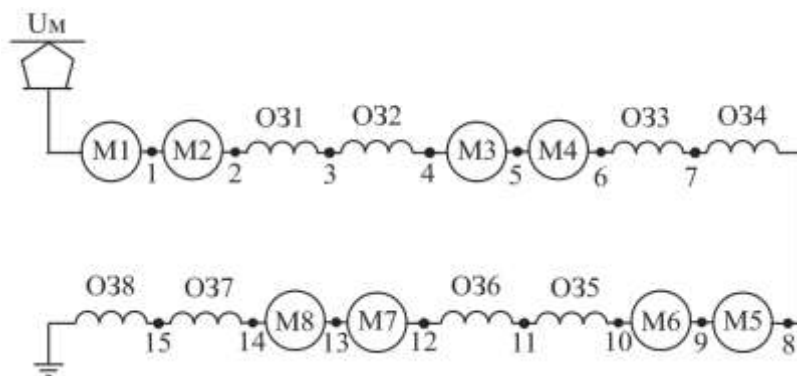


Рис. 1. Схема можливих варіантів виникнення КЗ при послідовному з'єднанні тягових електродвигунів 8-вісного електровозу постійного струму; М1-М8 – обмотки якоря тягових електродвигунів; О31-О38 – обмотки збудження ТЕД; 0-15 – можливі точки виникнення КЗ в силовому колі ЕРС;  $U_M = 3000$  В – напруга тягової контактної мережі

Також використано математичну модель (1) [7].

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_M - n_{\text{ДВ}} \cdot c_e \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{ДВ}} - n_{\text{ДВ}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ОЗ}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{ДВ}} \cdot (L_{\text{я}} + L_{\text{ОЗ}})}; \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = w_{\text{ЕКВ}} \cdot I_{\text{ОЗ}} + F_{\text{НЛК}}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = w_{\text{ЕКВ}} \cdot I_{\text{ОЗ}} + F_{\text{НЛК}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $n_{\text{ДВ}}$  – кількість тягових електродвигунів;

$w_{\text{ОЗ}}$  – кількість витків котушки збудження головного полюсу;

$\sigma$  – коефіцієнт розсіювання головних полюсів;

$w_{\text{ЕКВ}} \cdot I_{\text{ОЗ}}$  – магніторушійна сила збудження головних полюсів;

$F_{\text{НЛК}}$  – частина магніторушійної сили  $k$ -ї ділянки магнітної характеристики ГП, що створює магнітний потік головних полюсів.

Для порівняльного аналізу математична модель (1) побудована без урахування впливу динамічної індуктивності.

Взагалі під динамічною індуктивністю обмотки збудження головних полюсів ТЕД електрорухомого складу постійного струму розуміється індуктивність цієї обмотки з урахуванням динаміки зміни струму збудження в режимі короткого замикання.

Індуктивність обмотки збудження знаходиться за наступною формулою [8]:

$$L_{\text{дин}} = 2 \cdot p \cdot w_{\text{ОЗ}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}}, \quad (2)$$

де  $p$  – число пар головних полюсів ТЕД;

$w_{\text{ОЗ}}$  – кількість витків котушки збудження головного полюсу;

$\Phi$  – основний магнітний потік, [Вб];

$I_{\text{я}}$  – струм у колі якоря, [А].

Перепишемо (1) з урахуванням (2). Отримаємо математичну модель з урахуванням впливу динамічної індуктивності обмоток збудження ТЕД:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} &= \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{о3}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{я}} + 2 \cdot p \cdot w_{\text{о3}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}})}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) &= w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{о3}} + F_{\text{нлк}}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) &= w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{о3}} + F_{\text{нлк}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Як приклад за допомогою моделей (1) та (3) при двох умовах (з урахуванням впливу динамічної індуктивності та без) отримано криві залежності струму короткого замикання від часу  $I_{\text{кз}} = f(t)$  для точки 1 (схеми на рис. 1) виникнення КЗ (рис. 2) та точки 4 (рис. 3).

На рис. 2 та рис. 3:

1 – залежність  $I_{\text{кз}} = f(t)$  при постійній індуктивності;

2 – залежність  $I_{\text{кз}} = f(t)$  з урахуванням динамічної індуктивності обмоток збудження.

З рис. 2 видно, що значення струму при часі 0,6 с та швидкості зростання струму на початковому періоді (приблизно 0,005 с після початку короткого замикання) швидкості зростання струму КЗ в випадках 1 та 2 майже

однакові, бо в колі немає жодної з обмоток збудження ТЕД. Час 0,6 с визначено дослідним шляхом, як такий, після якого встановлюється стає значення струму КЗ. Тому вплив динамічної індуктивності відсутній і надалі точки 1 та 2 (схема на рис. 1) в роботі розглядатись не будуть.

Із рис. 3 видно, що значення струму при часі 0,6 с у двох випадках різні. Фізично це пояснюється впливом  $L_{\text{дин}}$  обмоток збудження тягових електродвигунів зі зростанням струму короткого замикання [8]. Усталене значення струму короткого замикання при часі більше 0,6 с у представлених двох випадках буде однаковим.

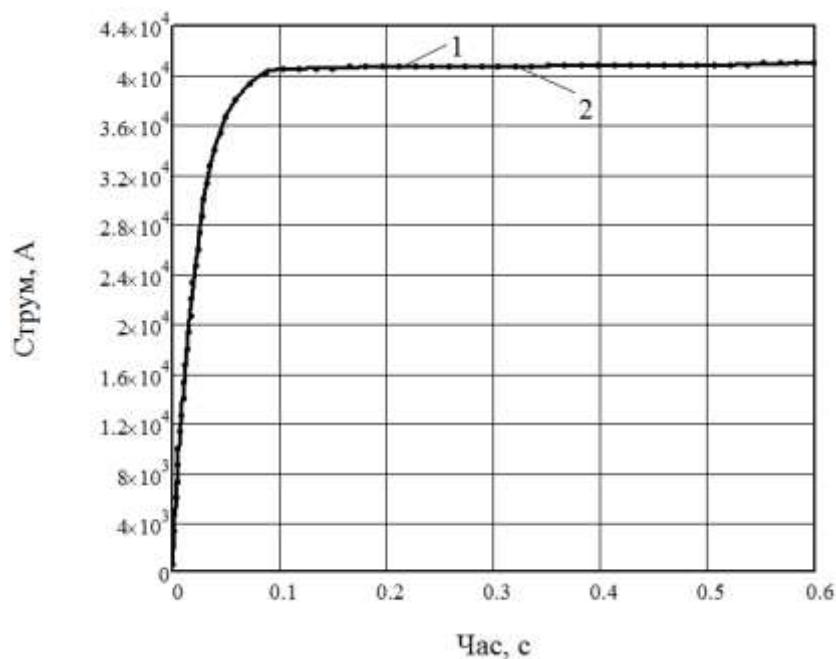


Рис. 2. Залежності струму КЗ від часу при короткому замиканні (точка 1 на схемі рис. 1)

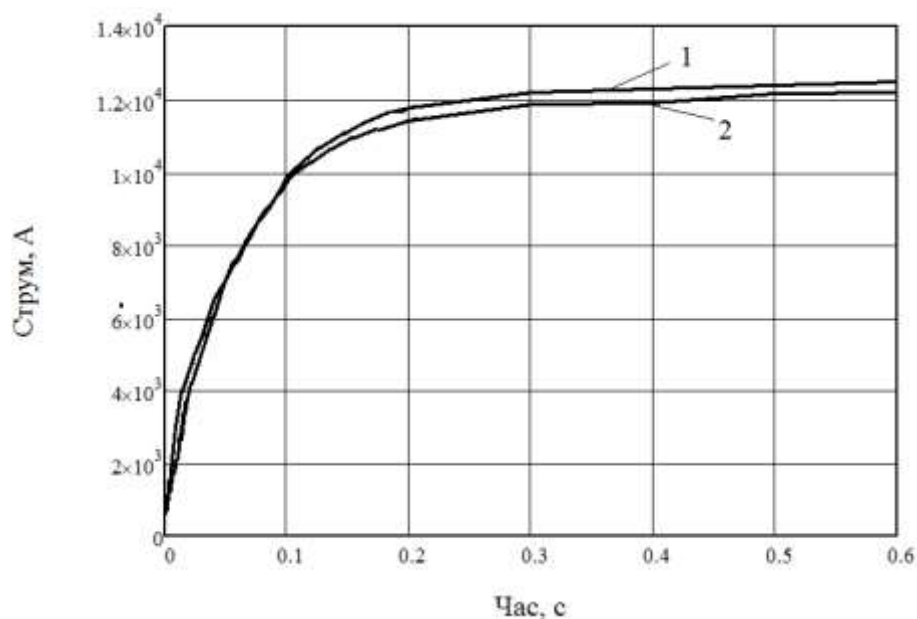


Рис. 3. Залежності струму КЗ від часу при короткому замиканні (точка 4 на схемі рис. 1)

В табл. 1 занесені для порівняння результати досліджень за моделями (1) та (3) при всіх можливих точках виникнення

короткого замикання (точки 3-15) у силовому колі при двох умовах.

Таблиця 1

Можливі точки виникнення короткого замикання (точки КЗ на схемі рис. 1)	Без урахування $L_{дин}$		З урахуванням $L_{дин}$	
	Значення струму КЗ $I_{КЗ}$ , А	$di_{К}/dt$ , А/с	Значення струму КЗ $I_{КЗ}$ , А	$di_{К}/dt$ , А/с
3	17200	324000	16000	384000
4	12000	176000	12300	234000
5	9000	154000	9270	203000
6	7200	137000	7340	180000
7	5800	90000	5950	134000
8	4660	60000	4800	106000
9	4000	55000	4080	98000
10	3500	50000	3350	91000
11	2800	33000	2600	76000
12	2190	21000	2150	64000
13	1980	20000	1960	60000
14	1790	17000	1770	57000
15	1350	8000	1330	50000

Значення струму КЗ визначено через час 0,6 с після початку короткого замикання. При появі в колі індуктивності обмоток збудження значення  $\frac{di_k}{dt}$  у випадку розрахунку з урахуванням динамічної індуктивності збільшуються в порівнянні з випадком, коли динамічна індуктивність не враховується. Зростання струму КЗ відбувається тим інтенсивніше, чим менше динамічна індуктивність кола короткого замикання [9]. Тому для підвищення точності при дослідженні

перехідних процесів та визначенні уставки для пристроїв захисту потрібно врахувати динамічний характер індуктивності обмоток збудження.

Для наглядності визначення та порівняння швидкості зміни струму при КЗ використано рис. 4, на якому показані збільшені за масштабом криві залежності струму короткого замикання від часу (за рис. 3) протягом 0,0001 с (час спрацьовування сучасних мікроконтролерів) після початку виникнення короткого замикання.

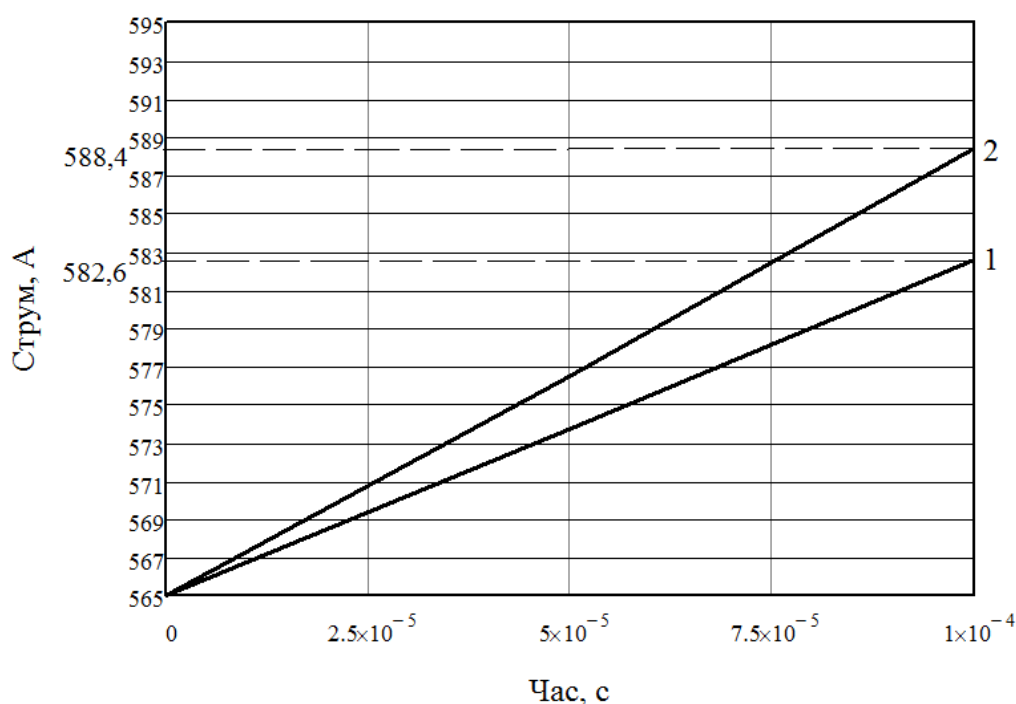


Рис. 4. Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні

Значення  $\frac{di_k}{dt}$  знайдено на інтервалі часу від 0 до 0,0001 с., який прийнятий як час реагування сучасних пристроїв захисту [10].

1) Без урахування дії динамічної індуктивності:  $\frac{di}{dt} = \frac{582,6 - 565}{0,0001} = 176000 \text{ А/с}$ ;

2) З урахуванням дії динамічної індуктивності:  $\frac{di}{dt} = \frac{588,4 - 565}{0,0001} = 234000 \text{ А/с}$ .

Різниця  $\frac{di_k}{dt}$  складає:  
 $\frac{234000 - 176000}{234000} \cdot 100 = 24,8 \%$ .

Аналогічно визначена різниця швидкості зростання струму при різних точках виникнення короткого замикання в колі ТЕД.

Наприклад, різниця  $\frac{di_k}{dt}$  при першому та другому варіантах (без динамічної індуктивності та з врахуванням дії динамічної індуктивності відповідно) складає:

15,6 % – точка 3 на схемі рис. 1;

21,4 % – точка 5 на схемі рис. 1;

23,9 % – точка 6 на схемі рис. 1;

32,8 % – точка 7 на схемі рис. 1.

Як видно, на значення  $\frac{di}{dt}$  на початку

КЗ впливає динамічна індуктивність. Аналогічні дослідження можна провести для всіх 15 точок вказаних на рис. 1.

**Висновки з дослідження, подальший розвиток у даному напрямку.** Отримані результати дослідження показують необхідність враховувати при налагодженні захисної апаратури для захисту силових кіл електрорухомого складу від коротких замикань на базі мікропроцесорів вплив динамічної індуктивності обмоток збудження.

### Список використаних джерел

1. Карзова, О.О. Пристрій захисту силових кіл електрорухомого складу на новій елементній базі [Текст] / О.О. Карзова // Вісн. НТУ «ХП». – 2011. – № 34. – С. 116-119.
2. Пат. 65719 Україна, МПК' (2011.01) H01H 83/00. Електронний блок захисту тягових електродвигунів електровоза постійного струму [Текст] / Карзова О.О. (Україна); заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2011 06857; заявл. 31.05.2011; опубл. 12.12.11, Бюл. № 23.
3. Висин, Н.Г. Модернізація силових схем електровоза ДЭ1 [Текст] / Н.Г. Висин, Б.Т. Власенко, А.И. Кийко, В.В. Ковалев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 43-50.
4. Муха, А.Н. Повышение надежности эксплуатируемого электроподвижного состава путем применения релейной аппаратуры на современной элементной базе [Текст] / А.Н. Муха // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту. Збірник наук. праць. - 2000. – Вип. 113. - С. 222-224.
5. Устименко, Д.В. Мікропроцесорний пристрій захисту двигунів від струмів короткого замикання [Текст] / Д.В. Устименко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. – С. 184-185.
6. Электровоз магистральный ДЭ-1. Техническое описание. [Текст] ЗТП.000.020-03 ТО. – 1999. – 188 с.
7. Дубинець, Л.В. Швидкість зміни струму при короткому замиканні в силових колах електрорухомого складу з урахуванням вихрових струмів [Текст] / Л.В. Дубинець, О.О. Карзова, Ю.С. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип.34. – С. 69-72.
8. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы [Текст] / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В. Горчаков, П.Н. Шляхто. – М.: «Транспорт», 1968. – 296 с.
9. Радченко, В.Д. Перенапряжения и токи короткого замыкания в устройствах электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст] / В.Д. Радченко, С.Д. Соколов, Н.Д. Сухопрудский. – М.: Гос. трансп. железнодорож. изд-во, – 1959. – 273 с.
10. Устименко, Д.В. Сучасні мікроконтролери в схемах рухомого складу [Текст] / Д.В. Устименко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 15. – С. 47-49.

Рецензент д-р техн. наук, професор М.М. Бабаєв

Карзова Оксана Олександрівна, канд. техн. наук, б/з, кафедра електротехніки та електромеханіки, ДНУЗТ.  
Тел. (056) 373-15-47, E-mail: karzova@i.ua

Karzova Oksana Aleksandrovna, cand. of techn. sciences, associate professor department of electrical engineering and electromechanics Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Tel.: (056) 373-15-47, E-mail: karzova@i.ua