

## УДК 656.259.2

Ю. С. БОНДАРЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта bondar198924@gmail.com, ORCID 0000-0002-5306-4820

## ПЕРЕДУМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В СТРУКТУРІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета.** Застосування фізичного моделювання в якості інструменту для проведення досліджень будь-яких явищ або систем набуває все більш широкого розповсюдження, у тому числі й у галузі залізничного транспорту. При цьому адекватність результатів, що їх можна отримати, багато в чому залежить від ступеню подібності фізичної моделі до реальної системи. З точки зору дослідження тягового асинхронного електроприводу (АТЕП), у сукупності з системою тягового електропостачання, подібність не може визначитися прямою пропорційністю параметрів, адже характер процесів, що супроводжує роботу цих систем, є нелінійним. Ці особливості мають бути враховані в експериментальній установці, основою побудови якої є встановлення подібності систем, що й визначає мету даної роботи. **Методика.** В основі створення експериментальної установки лежало відтворення процесів енергоперетворення в системі тягового електропостачання постійного струму. Визначення ступеню подібності запропонованої установки з реальною системою здійснювалось із використанням основних теорем теорії подібності, їх додаткових положень щодо складності та нелінійності систем, а також елементів математичного аналізу. **Результати.** За результатами роботи: 1) Отримано структурну схему, механізм енергоперетворення якої є подібним до реальної системи. Дана схема є основою експериментальної установки, побудованої, надалі, для дослідження електромагнітної сумісності АТЕП у структурі системи тягового електропостачання постійного струму; 2) Встановлено подібність отриманої структурної схеми до реальної системи з визначенням механізму розрахунку масштабних відношень. **Наукова новизна.** У процесі встановлення подібності запропоновано спрощену методику визначення масштабних відношень для нелінійних систем, які мають у своїй структурі однакові складові, але різні граничні параметри. **Практична значимість.** Експериментальне дослідження електро-магнітної сумісності АТЕП у структурі системи тягового електропостачання постійного струму з використанням елементів теорії подібності дозволить отримати більш адекватні результати і, як наслідок, створити передумови подальшого покращення процесу сукупного функціонування суміжних систем електрифікованих залізниць.

**Ключові слова:** тяговий асинхронний електропривод; теорія подібності; масштабні відношення; експериментальна установка

### Вступ

Впровадження на залізницях України електрифікованих постійним струмом електрорухомого складу (ЕРС) з тяговим асинхронним електроприводом (АТЕП) є на сьогодні одним з ключових напрямків їх розвитку. Поява у структурі системи тягового енергопостачання такої складової може вносити деякі «корективи» у роботу суміжних систем – здебільшого систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), що і так зазнають значного електромагнітного впливу [8, 17]. З метою запобігання можливим негативним наслідкам такої взаємної роботи постає

необхідність дослідження впливу ЕРС з АТЕП на вказані системи електрифікованих залізниць.

### Мета

З точки зору методу досліджень обрано фізичне моделювання, точність та адекватність результатів якого багато в чому залежить від ступеня подібності фізичної моделі до реальної системи [19]. У зв'язку з цим, на першому етапі виконання експериментального дослідження, постає необхідність розробки структурної схеми експериментальної установки, яка буде максимально точно відтворювати процеси у реальній системі, що в свою чергу вимагає встановлення подібності систем.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

## Методика

Згідно з третьою теорією подібності, теорією М. В. Кирпичева та А. А. Гухмана [8, 10, 11], необхідними та достатніми умовами для створення подібності є пропорційність параметрів, що входять до умов однозначності, та рівність критеріїв подібності зіставляємих процесів.

В загальному вигляді процеси в досліджуваному об'єкті описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь, що характеризують взаємодію між факторами та параметрами останнього. Таким чином, необхідною умовою подібності двох об'єктів є однаковий вигляд системи диференціальних рівнянь [6, 8], а, отже, однаковий характер взаємодії складових частин досліджуваних систем.

На рис. 1 наведено узагальнену структурну схему енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму з включенням до її складу електровоза з АТЕП.

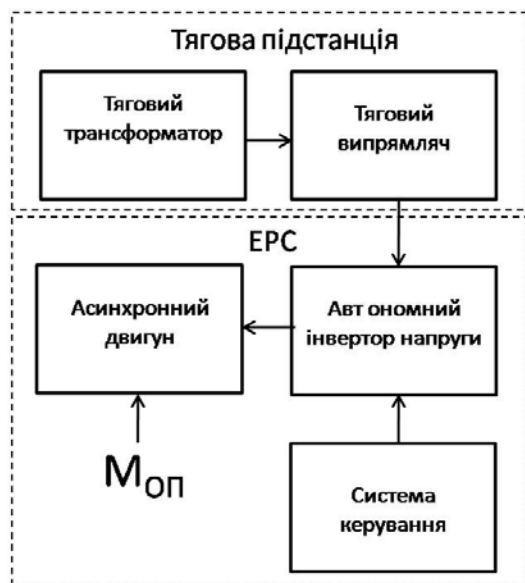


Рис. 1. Узагальнена структурна схема енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму

Fig. 1. Generalized block diagram of the energy conversion in the system of traction power supply of DC

Очевидно, що робота кожної зі складових ланок наведеної системи описується відповідною системою диференціальних рівнянь, які характеризують процеси їх функціонування. З цієї точки зору можна зробити припущення, що задля забезпечення подібності фізичної моделі до

реальної системи, в першому наближенні, достатнім є збереження послідовності процесу енергоперетворення, який в цьому випадку реалізується за такою схемою (рис. 1): тяговий трансформатор – тяговий випрямляч (енергія змінного струму в енергію постійного струму); тяговий випрямляч – статичний перетворювач частоти ЕРС (енергія постійного струму в енергію змінного струму).

На рис. 2 наведено структурну схему експериментальної установки, що пропонується до реалізації, розроблену відповідно до наведеного вище. Вона дозволяє здійснити узагальнений аналіз процесів енергоперетворення, що супроводжують її функціонування, а також встановити ступінь подібності до реальної системи у першому наближенні. Проаналізуємо вказані процеси.

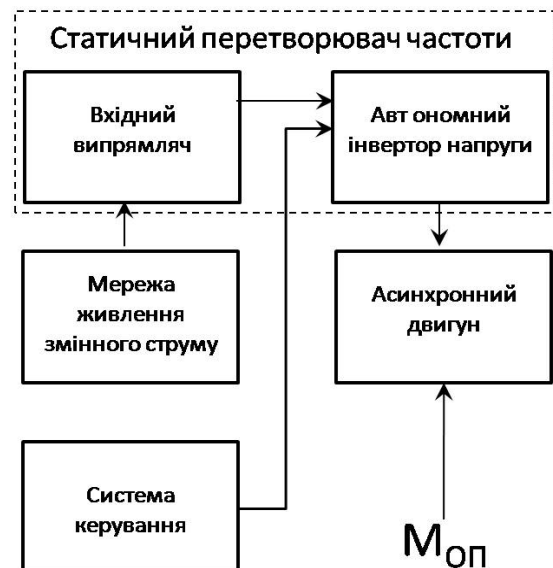


Рис. 2. Структурна схема експериментальної установки, що пропонується до реалізації

Fig. 2. Block diagram of the experimental facility, which is proposed for implementation

Вхідний випрямляч статичного перетворювача частоти в цьому випадку виконує роль випрямляча тягової підстанції (рис. 2) та в сукупності з мережею змінного струму утворює ланку перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму. В той же час, автономний інвертор напруги здійснює перетворення енергії постійного струму, що надходить від вхідного випрямляча, в енергію змінного струму. Тобто механізм перетворення енергії у створеній установці повністю відтворює механізм перетворення

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ня енергії у реальній системі. З цього факту можна зробити висновок, що в першому наближенні системи є подібними.

Для більш повного оцінювання ступеня подібності двох систем є необхідним встановлення відповідних критеріїв подібності, що передбачає детальний аналіз функціональних залежностей між фізичними параметрами, які характеризують процеси в досліджуваних системах.

Оскільки останні налічують у своєму складі декілька складових елементів, вони є складними. Згідно з першою додатковою теоремою про подібність такі системи є подібними, якщо забезпечується подібність всіх складових елементів, які для них є загальними. Тобто постає задача визначення та порівняння критеріїв подібності для спільних складових систем [2, 8].

В практиці вирішення задачі встановлення подібності існує два основних способи встановлення критеріїв подібності [2] – приведення рівнянь фізичного процесу до безрозмірного виду та з використанням  $\pi$ -теорема. Перший спосіб передбачає використання рівняння або системи рівнянь, що характеризують досліджувані процеси. Другий є більш універсальним, адже може

бути застосованим і для випадків, коли відомий лише перелік характерних параметрів об'єктів досліджень. Оскільки для деяких складових наведених систем прийнятними є різні режими роботи, які характеризуються різними системами диференціальних рівнянь, то з точки зору спрощення досліджень використання другого способу знаходження критеріїв подібності є більш раціональним.

Аналіз наведених вище структурних схем дозволяє визначити ті складові їх частини, які є більшою мірою аналогічними – це випрямлячі, автономні інвертори напруги (АІН) та асинхронні двигуни. Розглянемо кожну з них.

В практиці аналізу процесів енергоперетворення в будь-яких електричних системах основними рівняннями, що їх характеризують, є рівняння напруг [3, 6, 7, 19, 20]. Цей принцип дозволяє використовувати ці рівняння як базові під час оцінювання ступеня подібності систем.

В табл. 1 наведено рівняння напруг для кожної зі складових реальної системи та моделі [3, 5, 12]. Для трифазних елементів систем рівняння наведено для однієї фази енергоперетворення.

Таблица 1

## Рівняння напруг складових елементів систем

Table 1

## Stress equation of system components

Елемент системи	Модель	Реальна система
Трансформатор	$U_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$	$U_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$
Випрямляч	$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin(\omega t) d\omega t$	<p>– 6-пульсовий мостовий</p> $U_d = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} U_{2m_l} \cos(\omega t) d\omega t$ <p>– 2 зворотні зірки з урівнюючим реактором</p> $U_d = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} U_{2m_\phi} (\cos(\omega t) + \cos(\omega t - \frac{\pi}{3})) d\omega t$ <p>– 12-пульсовий</p> $U_d = \frac{\pi}{6} \int_{-\pi/12}^{+\pi/12} (\sqrt{3}U_{21m} \cos(-\frac{\pi}{12}) + U_{22m} \cos(\frac{\pi}{12})) \cos(\omega t) d\omega t$
Автономний інвертор напруги	$U_s(k) = \mu U_d \sin((k - \frac{1}{2}) \frac{\pi}{\varepsilon})$	$U_s(k) = \mu U_d \sin((k - \frac{1}{2}) \frac{\pi}{\varepsilon})$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Візуальне порівняння наведених рівнянь підтверджує їх відповідність, а отже і однаковість характеру енергоперетворення. Згідно з теорією подібності це є однією з достатніх умов подібності моделі до реальної системи. Виняток складають лише рівняння для випрямлячів, візуальна подібність яких відсутня.

Перелік рівнянь напруг для випрямлячів наведений відповідно до типу схем, що на сьогодні знаходять застосування у системах тягового електропостачання залізниць постійного струму [14]. Не зважаючи на відсутність візуальної подібності перелік параметрів, що характеризують процеси, є однаковим. А, отже, при знаходженні критеріїв подібності, згідно з відповідною методикою [2, 8], однаковими будуть і матриці розмірностей, що вказує на однаковість критеріїв подібності. В такому випадку, згідно з [2, 6, 8, 10, 11], найпростішою необхідною умовою існування подібності залишається наявність пропорційності параметрів, що входять до умов однозначності.

З точки зору характеру досліджень, а також відповідно до специфіки моделювання електроенергетичних систем [8], таким параметром є їх встановлена потужність. Відповідно до цього, для остаточного встановлення подібності є необхідним здійснити приведення потужності пропонованої фізичної моделі до потужності реальної системи, тобто визначити відповідні масштабні коефіцієнти.

Для пояснення методики пошуку проведемо визначення шуканих коефіцієнтів для однієї зі складових розглянутих структурних схем – асинхронних двигунів. В цьому випадку встановлення масштабних відношень здійснюється з урахуванням використання у складі розглянутих систем двигунів потужністю 750 Вт, наприклад АИР71А2, що встановлені в частотних приводах лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» та 1 200 кВт, наприклад СТА1200У1, що використовується у складі тягового електроприводу ЕРС з АТЕП [15].

Складність визначення масштабних коефіцієнтів полягає у наявності значної розбіжності параметрів зіставляємих об'єктів та нелінійності їх характеристик. В теорії подібності та моделювання [6, 8] подібність таких систем визначається з використанням другого додаткового положення про подібність шляхом побудови відносних характеристик нелінійних параметрів.

В цьому випадку отримання необхідних масштабних відношень виконується з використанням характеристики, отриманої шляхом усереднення побудованих відносних характеристик. Останні є графічними залежностями, що характеризують зміну параметрів систем, виражених у долях відносно деякої базисної величини [8].

На рис. 3 наведено графічні залежності виду  $I_1 = f(P_2)$  [3], побудовані для вказаних двигунів з урахуванням застосування другої додаткової теореми про подібність. Як базисні параметри в цьому випадку прийнято номінальний струм та потужність відповідно.

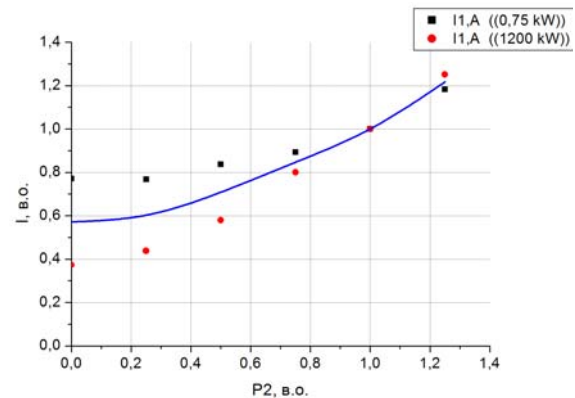


Рис. 3. Відносні характеристики асинхронних двигунів

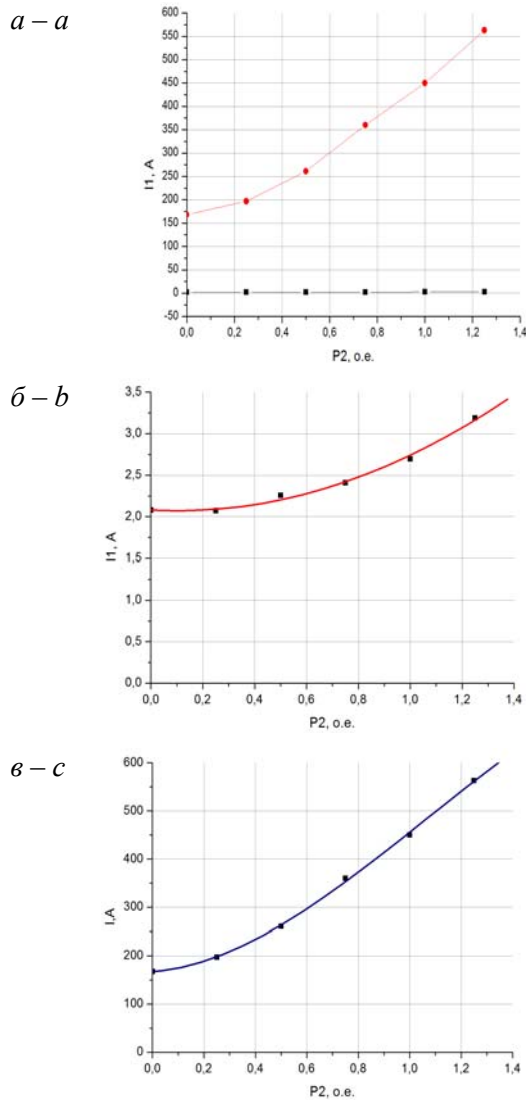
Fig. 3. Relative characteristics of asynchronous motors

Аналіз цих графічних залежностей вказує на значну незбіжність відносних характеристик, що загалом не відповідає умовам застосування додаткового положення про подібність нелінійних систем [8]. Тому його використання є недоцільним.

В загальному випадку для отримання шуканих масштабних коефіцієнтів є необхідним виконати перехід від характеристик двигуна потужністю 750 Вт до характеристик двигуна потужністю 1 200 кВт, здійснити який можливо шляхом їх інтерполяції деякими функціями.

На рис. 4 наведено інтерпольовані характеристики двигунів моделі та оригіналу, побудовані в одній системі координат (рис. 4, а), а також характеристики кожного з двигунів окремо. Побудову характеристик здійснено за допомогою програмного середовища OriginPRO 8, що має вбудовану функцію інтерполяції графічних залежностей [4].

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Рис. 4. Интерпольовані залежності  $I_1 = f(P_2)$ 

- для двигунів моделі та оригіналу:  
 а – інтерпольовані характеристики двигунів;  
 б – характеристика двигуна AIR71A2;  
 в – характеристика двигуна STA1200U1.

Fig. 4. Intercalated dependencies  $I_1 = f(P_2)$  for the engines of model and original:  
 а – intercalated dependencies of engines  
 б – characteristics of the engine AIR71A2;  
 в – characteristics of the engine STA1200U1.

Побудову характеристик (рис. 3, 4) здійснено з урахуванням [1, 13] для двигуна малої потужності, а також колової діаграми для двигуна STA1200 [16].

Результатом апроксимації наведених графічних залежностей є аналітичні вирази, які у подальшому дозволяють отримати масштабні коефіцієнти для всього діапазону потужностей:

– для малої потужності

$$I_{1M} = 2,08073 - 0,17117P_{2M} + 0,83006P_{2M}^2; \quad (1)$$

– для великої потужності

$$I_{1B} = 167,33333 + 39,20635P_{2B} + 363,04762P_{2B}^2 - 113,77778P_{2B}^3. \quad (2)$$

Отримані вирази пов'язують між собою значення струмів двигунів АИР71А2 потужністю 750 Вт та СТА1200У1 потужністю 1 200 кВт. При цьому запропонована методика дозволяє визначати масштабні відношення для двигунів будь-якої потужності, що вказує на доцільність її використання.

Асинхронні двигуни, які є головними ланками розглянутих систем (рис. 1, 2) є найбільш нелінійними елементами. Інші складові цих схем енергоперетворення мають однакові рівняння з лінійними масштабними коефіцієнтами, як правило, за напругою. Тому, в подальшому, загальний масштабний коефіцієнт для всієї системи приймаємо як добуток масштабних коефіцієнтів всіх складових ланок.

Кінцевою метою встановлення масштабних відношень є приведення потужностей всіх складових розглянутих систем, а також їх потужностей в цілому. З урахуванням цього для прикладу розглянутих двигунів отримуємо:

$$m_P = \frac{P_{1B}}{P_{1M}} = \frac{K_{ВИП.В} K_{ИНВ.В} U_{2TP} \cdot I_{1B}(P_{2B})}{K_{ВИП.М} K_{ИНВ.М} U_{МЕР} \cdot I_{1M}(P_{2M})}, \quad (3)$$

звідки загальний масштабний коефіцієнт для розглянутих систем:

$$m_P = \frac{P_{1OP}}{P_{1МОД}} = \frac{K_{ВИП.М} K_{ИНВ.М} U_{1B} I_{1B}(P_{2B})}{K_{ВИП.В} K_{ИНВ.В} U_{1M} I_{1M}(P_{2M})}, \quad (4)$$

де  $K_{ВИП.М}$ ,  $K_{ВИП.В}$  – коефіцієнти перетворення за напругою для випрямлячів системи малої та великої потужностей відповідно (рис. 1, 2);  $K_{ИНВ.М}$ ,  $K_{ИНВ.В}$  – коефіцієнти перетворення за напругою для АИН;  $U_{2TP}$ ,  $U_{МЕР}$  – напруга на первинному етапі енергоперетворення обох систем (тяговий трансформатор – тяговий випрямляч, мережа змінного струму – вхідний випрямляч);  $I_{1B}(P_{2B})$ ,  $I_{1M}(P_{2M})$  – аналітичні вирази апроксимації характеристик двигунів в загальному вигляді;  $U_{1B}$ ,  $U_{1M}$  – напруга живлення двигунів реальної системи енергоперетворення та моделі

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

відповідно (вихідна напруга АН). Очевидно, що дана складова в процесі функціонування систем є змінною. Так зміна вихідної потужності електродвигуна здійснюється відповідно до зміни вихідної напруги АН, що в свою чергу супроводжується відповідною зміною значення струму  $I_1$  (рис. 4). Таким чином, знаходження масштабних відношень для струму автоматично призводить до знаходження масштабних відношень для потужності, що вказує на можливість здійснення масштабного переходу від системи до системи лише за допомогою рівнянь апроксимації (1) та (2). Крім того ці рівняння можливо використовувати у подальшому для знаходження числових значень масштабних коефіцієнтів не лише для двигунів, а й для систем в цілому.

Приклад визначення масштабних коефіцієнтів для струмів двигунів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Визначення масштабних коефіцієнтів для двигунів АІР71А2 та СТА1200**

Table 2

**Determining the scale factors for AIR71A2 and STA1200 engines**

Струм двигуна АІР71А2, А	Струм двигуна СТА1200У1, А	Визначений масштабний коефіцієнт
2,08	168,5	81,14
2,09	198,2	94,83
2,21	267,0	120,8
2,41	349,6	145,0
2,7	444,4	164,6
3,19	567,0	177,8

Як бачимо, отримані коефіцієнти є нелінійними, що підтверджує можливість відтворення не лише числових значень цього параметру, а й нелінійний характер залежностей  $I_1 = f(P_2)$ .

### Результати

В результаті роботи отримано структурну схему, механізм енергоперетворення якої є подібним до реальної системи. Ця схема є основою експериментальної установки, побудованої, в подальшому, для дослідження електромагнітної сумісності АТЕП у структурі системи тягового електропостачання постійного струму; встановлено подібність отриманої структурної

схеми до реальної системи з визначенням механізму розрахунку масштабних відношень.

### Наукова новизна та практична значимість

В процесі встановлення подібності запропоновано спрощену методику визначення масштабних відношень для нелінійних систем, які мають у своїй структурі однакові складові, але різні граничні параметри.

Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності АТЕП в структурі системи тягового електропостачання постійного струму з використанням елементів теорії подібності дозволить отримати більш адекватні результати і, як наслідок, створити передумови подальшого покращення процесу сукупного функціонування суміжних систем електрифікованих залізниць.

### Висновки

Встановлення масштабних відношень у сукупності з попереднім визначенням критеріїв подібності дозволяє остаточно стверджувати, що розглянуті системи є подібними. Такий висновок підтверджує можливість створення експериментальної установки відповідно до запропонованої структурної схеми, а також отримання з її допомогою адекватних результатів подальших досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Асинхронные двигатели серии 4А : справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Бабаков, М. Ф. Методы машинного моделирования в проектировании электронной аппаратуры / М. Ф. Бабаков, А. В. Попов. – Х. : Изд-во ХАИ, 2001. – 90 с.
3. Безрученко, В. Н. Электрические машины / В. Н. Безрученко. – К. : Вища школа, 1980. – 215 с.
4. Богданов, А. А. Визуализация данных в Microsoft Origin / А. А. Богданов. – М. : Альтекс-А, 2003. – 104 с.
5. Богрый, В. С. Математическое моделирование тиристорных преобразователей / В. С. Богрый, А. А. Русских. – М. : Энергия, 1972. – 184 с.
6. Бойко, Н. Г. Теория и методы инженерного эксперимента : курс лекций / Н. Г. Бойко, Т. А. Устименко. – Донецк : ДНТУ, 2009 – 155 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – М. : Транспорт, 1999. – 464 с.
8. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В. А. Веников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1976. – 479 с.
9. Вісін, М. Г. Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею / М. Г. Вісін, Д. О. Забарилло // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 75–82.
10. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. / А. А. Гухман. – М. : Высшая школа, 1973. – 296 с.
11. Кирпичев, М. В. Математические основы теории подобия / М. В. Кирпичев, П. К. Конаков. – М., Л. : Изд-во АН СССР, 1949. – 106 с.
12. Литовченко, В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями / В. В. Литовченко // Электротехника. – 1993. – № 5. – С. 23–31.
13. Мощинский, Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
14. Прохорский, А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции / А. А. Прохорский. – М. : Транспорт, 1983. – 496 с.
15. Соколов, Ю. Н. Электровоз ДСЗ. Конспект для локомотивных бригад. Устройство, управление, обслуживание / Ю. Н. Соколов. – К. : КУЕТТ, 2011. – 299 с.
16. ТХ 218.1039. Протокол квалификационных испытаний асинхронного двигателя СТА-1200У1. – Харьков : ГП «Электротяжмаш», 2008. – 100 с.
17. Щека, В. І. Дослідження впливу зворотнього тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Яшук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 24–28.
18. Application of similarity theory in research on consistency in multi-resolution modeling / C.-L. Hou, Y.-S. Jiang, X.-Z. Qi, X. Wei // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 562–564. – P. 2128–2133.
19. Sandoval-Ibarra, F. Basic circuit to design switched-based DC-DC converters / F. Sandoval-Ibarra, J. R. Mercado-Moreno, R. H. Uriostegui-Vazquez // Revista Mexicana De Fisica. – 2007. – Iss. 53 (2). – P. 128–133.
20. Vasuki, P. Power factor improvement in three phase AC-AC converter through modified SPWM / P. Vasuki, R. Mahalakshmi // Int. J. of Engineering Science and Technology (IJEST). – 2011. – Vol. 3, № 2. – P. 1438–1445.

Ю. С. БОНДАРЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта bondar198924@gmail.com, ORCID 0000-0002-5306-4820

## ПРЕДПОСЫЛКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель.** Применение физического моделирования в качестве инструмента для проведения исследований любых явлений или систем приобретает все более широкое распространение, в том числе и в области железнодорожного транспорта. При этом адекватность результатов, которые можно получить, во многом зависит от степени сходства физической модели с реальной системой. С точки зрения исследования тягового асинхронного электропривода (АТЭП), в совокупности с системой тягового электроснабжения, сходство не может определяться прямой пропорциональностью параметров, ведь характер процессов, сопровождающий работу этих систем, является нелинейным. Эти особенности должны быть учтены в экспериментальной установке, основой построения которой является установление сходства систем, что и определяет цель данной работы. **Методика.** В основе создания экспериментальной установки лежало воспроизведение процессов энергопреобразования в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Определение степени сходства предлагаемой установки с реальной системой осуществлялось с использованием основных теорем теории подобия, их дополнительных положений по сложности и нелинейности сис-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тем, а также элементов математического анализа. **Результаты.** По результатам работы: 1) Получена структурная схема, механизм энергопреобразования которой подобен реальной системе. Данная схема является основой экспериментальной установки, построенной, в дальнейшем, для исследования электромагнитной совместимости АТЭП в структуре системы тягового электроснабжения постоянного тока; 2) Установлено сходство полученной структурной схемы с реальной системой с определением механизма расчета масштабных отношений. **Научная новизна.** В процессе установления сходства предложена упрощенная методика определения масштабных отношений для нелинейных систем, которые имеют в своей структуре одинаковые составляющие, но разные предельные параметры. **Практическая значимость.** Экспериментальное исследование электромагнитной совместимости АТЭП в структуре системы тягового электроснабжения постоянного тока с использованием элементов теории подобия позволит получить более адекватные результаты и, как следствие, создать предпосылки для дальнейшего улучшения процесса совокупного функционирования смежных систем электрифицированных железных дорог.

*Ключевые слова:* тяговый асинхронный электропривод; теория подобия; масштабные соотношения; экспериментальная установка

YU. S. BONDARENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail bondar198924@gmail.com, ORCID 0000-0002-5306-4820

## BACKGROUNDS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TRACTION ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES IN THE STRUCTURE OF DC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

**Purpose.** Application of physical modeling as a tool for research of any events or systems is becoming more widespread, including the field of railway transport. At the same time the adequacy of results that can be obtained, depends largely on the similarity degree of the physical model to real system. From the standpoint of the traction asynchronous electric drive (TAED) research together with the traction power supply system research, the similarity can not be determined by the direct proportion of the parameters, because the processes nature accompanying the operation of these systems is non-linear. These features should be taken into account in the experimental setup, the basis for constructing of which is establishing of the system similarity that defines the purpose of this paper. **Methodology.** At the heart of the experimental setup creation laid reproduction of processes of energy transformation in the system of the DC traction power supply. Determination of the similarity degree of the proposed facility to the real system was carried out using the basic theorems of the similarity theory, their additional provisions on the complexity and nonlinear systems, as well as elements of mathematical analysis. **Findings.** According to the results of work: 1) The block diagram, the energy conversion mechanism of which is similar to the real system was received. This scheme is the basis of experimental setup, built in the future for the study of electromagnetic compatibility of TAED in the structure of DC traction electric power supply system. 2) Similarity of obtained structural scheme with the real system with the mechanism definition of calculating the scaling relations was established. **Originality.** In the process of establishing the similarity a simplified method for determining the scaling relations for nonlinear systems was suggested. They are identical in their structure components, but have different capacities. **Practical value.** Experimental research of electromagnetic compatibility of TAED in the structure of traction power DC system using the elements of similarity theory will provide more adequate results and, as a consequence, create preconditions for further improvement process of the aggregate related systems functioning of electrified railways.

*Keywords:* traction asynchronous electric drive; similarity theory; scaling relations; experimental setup

### REFERENCES

1. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya Ye.A. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A* [Induction motors series 4A]. Moscow, Energoizdat Publ, 1982. 504 p.
2. Babakov M.F., Popov A.V. *Metody mashinnogo modelirovaniya v proyektirovanii elektronnoy apparatury* [Methods of computer simulation in the design of electronic equipment]. Kharkov, KhAI Publ., 2001. 90 p.
3. Bezruchenko V.N. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical machines]. Kyiv, Vysshaya shkola Publ., 1980. 215 p.



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

4. Bogdanov A.A. *Vizualizatsiya dannykh v Microcal Origin* [Data Visualization in Microcal Origin.]. Moscow, Alteks-A Publ., 2003. 104 p.
5. Bogryy V.S., Russkikh A.A. *Matematicheskoye modelirovaniye tiristornykh preobrazovateley*. [Mathematical modeling of thyristor converters]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 184 p.
6. Boyko N.G., Ustimenko T.A. *Teoriya i metody inzhenerenogo eksperimenta* [Theory and methods of engineering experiment]. Donetsk, DNTU Publ., 2009. 155 p.
7. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic equipment and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.
8. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitelno k zadacham elektroenergetiki)* [Similarity theory and modeling (applied to the problems of electric power)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 479 p.
9. Visin M.G., Zabarilo D.O. Pidvyschennia elektromahnitnoi sumisnosti reikovykh kil z elektrorukhomym skladom podviinoho zhyvlennia z asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy ta tiahovoiu merezheiu [Electromagnetic compatibility improvement of track circuits with electric stock of doubly-fed with asynchronous traction motor and traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp.75-82.
10. Gukhman A.A. *Vvedeniye v teoriyu podobiya* [Introduction to the similarity theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 296 p.
11. Kirpichev M.V., Konakov P.K. *Matematicheskiye osnovy teorii podobiya*. [Mathematical foundations of the similarity theory]. Moscow, AN SSSR Publ., 1949. 106 p.
12. Litovchenko V.V. Opredeleniye energeticheskikh pokazateley elektropodvizhnogo sostava peremennogo toka s 4q-S-preobrazovatelyami [Determination of power indicators of AC electric rolling stock with 4q-S-converters]. *Elektrotekhnika – Electrotechnics*, 1993, no. 5, pp. 23-31.
13. Moshchinskiy Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Opredeleniye parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoy mashiny po kataloghnym dannym [Determination of equivalent network parameters of an induction machine on catalog data]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1998, no. 4, pp. 38-42.
14. Prokhorskiy A.A. *Tyagovyie i transformatornyie podstantsii* [Traction and transformer substations]. Moscow, Transport Publ., 1983. 496 p.
15. Sokolov Yu.N. *Elektrovoz DS3. Konspekt dlya lokomotivnykh brigad. Ustroystvo, upravleniye, obsluzhivaniye* [DS3 locomotive. Synopsis for foot-plate staff. Structure, management, maintenance]. Kyiv, KUYeTT Publ., 2011. 299 p.
16. *TKh 218.1039. Protokol kvalifikatsionnykh ispytaniy asinkhronnogo dvigatelya STA-1200U1* [TX 218.1039. Quali-fication testing protocol of STA- 1200U1 asynchronous motor]. Kharkov, GP «Elektrotiyazhmash» Publ., 2008. 100 p.
17. Shcheka V.I., Romantsev I.O., Yashchuk K.I. Doslidzhennia vplyvu zvorotnogo tiahovoho strumu na rezhymy roboty tonalnykh reikovykh kil [Investigation of the back traction current influence on operating regime of tonal rail circuits]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp.24-28.
18. Hou C.-L., Jiang Y.-S., Qi X.-Z., Wei X. Application of similarity theory in research on consistency in multi-resolution modeling. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 562-564, pp. 2128-2133.
19. Sandoval-Ibarra F., Mercado-Moreno J.R., Uriostegui-Vazquez R.H. Basic circuit to design switched-based DC-DC converters. *Revista Mexicana De Fisica*, 2007, issue 53 (2), pp. 128-133.
20. Vasuki P., Mahalakshmi R. Power factor improvement it three phase AC-AC converter through modified SPWM. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 1438-1445.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. М. Мухомою (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Поступила до редколегії 21.02.2014

Прийнята до друку 09.04.2014