

УДК 621.314.2

**Сергій Гулак**

(старший викладач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту)

**Едуард Єрмоленко**

(аспірант кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту)

**Андрій Гаюр**

(старший викладач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту)

**Олександр Сидоренко**

(студент гр. 3-ЕМ Державного економіко-технологічного університету транспорту)

### **МОДЕЛЬ МОТОР-ВЕНТИЛЯТОРА ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-80<sup>К</sup> ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ФАЗНИХ НАПРУГ ТА НЕСИНУСОЇДАЛЬНІЙ НАПРУЗІ ЖИВЛЕННЯ**

У статті розглянуті та досліджені принципи побудови моделі асинхронного двигуна АЭ-92-4, що використовується на електровозах ВЛ-80<sup>К,Т</sup> як мотор-вентилятор при несиметрії фазних напруг та несинусоїдальній напрузі живлення. Обґрунтовано вибір математичної моделі, за допомогою якої описується робота мотор-вентилятора в зазначених режимах роботи, розраховані його параметри та побудована модель в програмному середовищі Simulink програмного пакета MATLAB. Зазначена можливість подальшого моделювання приводу допоміжних машин (фазорозчіплювача, мотор-компресора та мотор-насоса) з метою дослідження зазначених режимів роботи асинхронних двигунів на загальний коефіцієнт потужності приводу допоміжних машин електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup> та розробки методів з підвищення коефіцієнта потужності.

**Ключові слова:** Модель мотор-вентилятора,  $\alpha, \beta, \gamma$  – координати, несиметрія фазних напруг, несинусоїдальна напруга живлення, потокоццеплення ротора, потокоццеплення статора, коефіцієнт потужності.

В статье рассмотрены и исследованы принципы построения модели асинхронного двигателя АЭ-92-4, используемого на электровозах ВЛ-80<sup>К, Т</sup> в качестве мотор-вентилятора при несимметрии фазных напряжений и несинусоидальном напряжении питания. Обоснован выбор математической модели, с помощью которой описывается работа мотор-вентилятора в указанных режимах работы, рассчитаны его параметры и построена модель в программной среде Simulink программного пакета MATLAB. Указанная возможность дальнейшего моделирования привода вспомогательных машин (расцепителя фаз, мотор-компрессора и мотор-насоса) с целью исследования указанных режимов работы асинхронных

© Гулак С. О., Єрмоленко Е. К., Гаюр. А. В., Сидоренко О. А., 2017

*двигателей на общий коэффициент мощности привода вспомогательных машин электровозов серии ВЛ80<sup>Т,К</sup> и разработки методов по повышению коэффициента мощности.*

**Ключевые слова:** Модель мотор-вентилятора,  $\alpha, \beta, \gamma$  – координаты, несимметрия фазных напряжений, несинусоидальное напряжение питания, потокосцепление ротора, потокосцепление статора, коэффициент мощности.

**Постановка проблеми.** Тенденція до подорожчання енергоносіїв з кожним роком набуває все більших масштабів, тому будь-яке впровадження енергозберігаючих технологій є, як ніколи, доречним. Створення моделі системи допоміжних машин електровоза ВЛ80<sup>Т,К</sup> є частиною роботи з підвищення коефіцієнта потужності даної серії електровозів. Перед вибором технічного рішення з модернізації для підвищення коефіцієнта потужності необхідно проаналізувати електромагнітні явища, які проходять в електричних колах системи «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз», їхня сутність і причини виникнення. Тому до раніше створеної моделі тягового приводу необхідно додати модель системи допоміжних машин. В сукупності вони дадуть повну модель електричної частини електровоза, що дозволить в повній мірі проаналізувати всі електромагнітні процеси, які виникають у цих колах, а також після вибору технічного рішення, зробити необхідні досліди та розрахунки з ефективності впровадження модернізації.

Важливим етапом аналізу роботи електропривода допоміжних машин при несиметрії фазних напруг асинхронних двигунів та при несинусоїдальній напрузі живлення є моделювання. Побудова реальної моделі з параметрами, які максимально наближені до предмета моделювання, виявляє низка непередбачуваних проблем, котрі можуть з'явитися в процесі експлуатації мотор-вентилятора електровоза.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведено аналіз факторів, які впливають на вибір моделі асинхронного двигуна при несиметрії фазних і несинусоїдальній напрузі живлення, та обґрунтовано застосування  $\alpha, \beta, \gamma$ -координат для побудови математичної моделі мотор-вентилятора електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup> [1, 2].

Для аналізу роботи мотор-вентилятора з метою дослідження впливу несиметрії фазних та несинусоїдальної напруги живлення на коефіцієнт потужності приводу допоміжних машин необхідно розробити його математичну модель, яка б адекватно відображала процеси, що відбуваються в асинхронному двигуні в зазначених режимах роботи.

**Мета статті.** Проаналізувати, як впливає несиметрія фазних напруг асинхронного та несинусоїдальність напруги живлення мотор-вентилятора на коефіцієнт потужності допоміжного привода електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup>. Обґрунтувати заходи, щодо підвищення коефіцієнта потужності допоміжного електропривода електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup>.

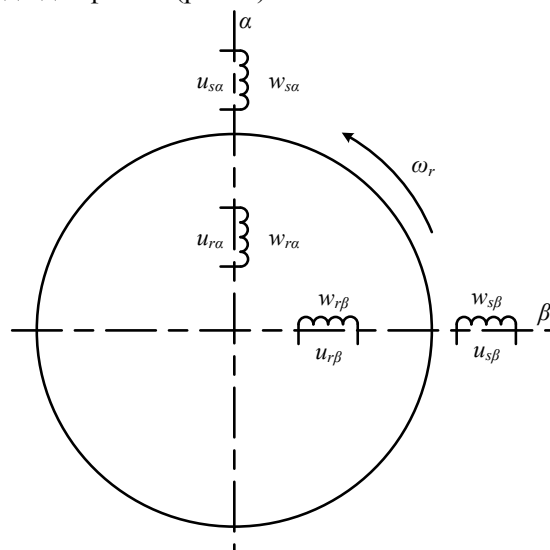
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Найпростішим та найпопулярнішим методом моделювання асинхронного двигуна є схема заміщення. При практичних розрахунках замість реального асинхронного двигуна, його замінюють еквівалентною схемою заміщення, в якій електромагнітний зв'язок між статором і ротором замінений на електричний. При цьому параметри ланцюга ротора приводяться до параметрів ланцюга статора. Простий метод, який дозволяє без розв'язку складних диференціальних рівнянь знайти характеристики машини, величини струмів, моментів та ін. По суті, результати, які дає схема заміщення, є результатом розв'язку комплексних алгебраїчних рівнянь для електричної схеми заміщення, які придатні для опису процесів в електричній машині тільки в довготривалому режимі та при круговому полі в зазорі машини, тобто при симетричному режимі роботи та однакових параметрів усіх фаз.

Звичайно ж допоміжні машини працюють у режимі несиметрії фазних напруг та несинусоїдальності напруг та струмів живлення. Причому розчіплювач фаз є несиметричною електричною машиною, в якій різна кількість витків в обмотці статора на різних фазах.

Для таких задач підходить математична модель на основі диференційних рівнянь – узагальнений електромеханічний перетворювач. В цій моделі енергія магнітного поля машини концентрується в повітряному зазорі, а за рахунок зміщення струмів у часі та обмоток у просторі в повітряному зазорі створюється кругове поле, в результаті чого отримується чітка картина фізичних явищ, яка розкриває суть електромагнітного перетворення енергії. Математична модель на базі диференційних рівнянь більш адекватно відображає всі процеси електромеханічного перетворення, ніж схеми заміщення та векторні діаграми. Будь-які добутки струмів і напруг в математичній моделі мають фізичний сенс, оскільки ця модель адекватно виражає процеси перетворення енергії в повітряному зазорі машини. Електромагнітний момент електричної машини виражається всіма можливими комбінаціями добутків струмів, які протікають в контурах статора і ротора машини.

У найпростішому і загальному випадку узагальнена електрична машина – це дво полюсна двофазна симетрична ідеалізована машина, яка має дві пари обмоток на статорі й роторі (рис. 1).

Кругове поле в повітряному зазорі може бути не тільки двофазним, а й три-, чотири-,  $m$ -фазним узагальненої електричної машини. Якщо багатофазна машина симетрична, а напруги на її обмотках синусоїдальні, то зручно аналізувати багатофазну машину, якщо привести її до двофазної (рис. 1).



**Рис. 1. Електрична машина як дво полюсна двофазна симетрична ідеалізована машина, що має дві пари обмоток на статорі і роторі**

Однак у нашому випадку ми маємо справу з несиметричною машиною (розчіплювач фаз), а також наявність просторових гармонік і несинусоїдальності напруги живлення, тому приводити машину до двофазної неправомерно, оскільки поля в зазорі двофазної та багатофазної у цих умовах будуть відрізнятися одне від одного. Тому в цьому випадку доцільно використати математичну модель ідеалізованої трифазної узагальненої машини в загальмованій системі координат  $(\alpha, \beta, \gamma)$  (рис. 2).

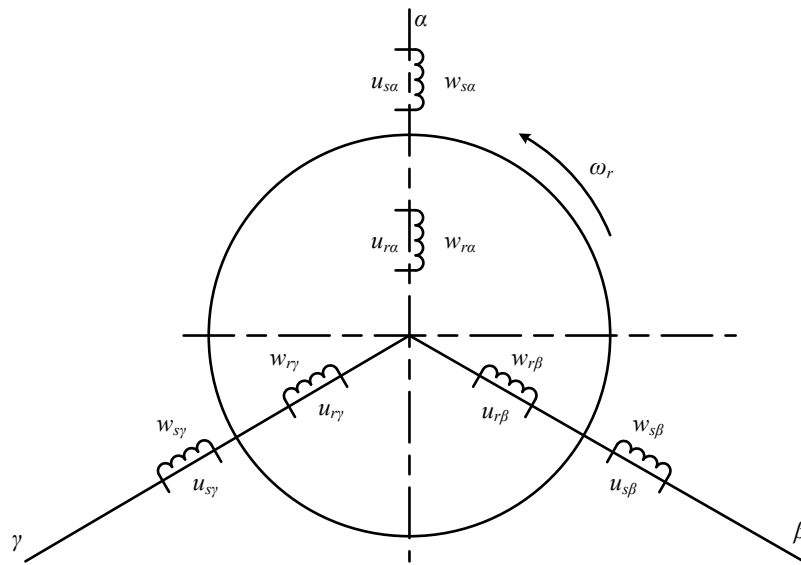


Рис. 2. Математичну модель ідеалізованої трифазної узагальненої машини в загальмованій системі координат  $(\alpha, \beta, \gamma)$

Ця модель описується такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} = r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \\ u_{s\gamma} = r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt}; \\ -u_{r\alpha} = r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{(\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}) \cdot p \cdot \omega_r}{\sqrt{3}}; \\ -u_{r\beta} = r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \frac{(\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha}) \cdot p \cdot \omega_r}{\sqrt{3}}; \\ -u_{r\gamma} = r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + \frac{(\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}) \cdot p \cdot \omega_r}{\sqrt{3}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Прийняті звичайні для електромагнітної машини припущення: кожна з трьох обмоток створює в гладкому зазорі синусоїально розподілену МРС, коефіцієнт насичення магнітного ланцюга незмінний. У виразі (1) і далі прийняті такі позначення:  $u$  – напруга;  $i$  – струм;  $t$  – час;  $r$  – активний опір;  $\Psi$  – потокощеплення;  $\omega_r$  – механічна частота обертання ротора;  $p$  – число пар полюсів. Нижні індекси  $\alpha, \beta, \gamma$  – позначають приналежність до відповідної фази. Нижній індекс  $s$  позначає приналежність до статора,  $r$  – приналежність до ротора, а індекс  $\mu$  – до ланцюга намагнічування.

Потокощеплення:

$$\begin{aligned}\psi_{s\alpha} &= L_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{s\beta} + M \cdot i_{s\gamma}) + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma} \right); \\ \psi_{s\beta} &= L_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{s\alpha} + M \cdot i_{s\gamma}) + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma} \right); \\ \psi_{s\gamma} &= L_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{s\alpha} + M \cdot i_{s\beta}) + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} \right).\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\psi_{r\alpha} &= L_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{r\beta} + M \cdot i_{r\gamma}); \\ \psi_{r\beta} &= L_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{r\alpha} + M \cdot i_{r\gamma}); \\ \psi_{r\gamma} &= L_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left( i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} \right) - \frac{1}{2} \cdot (M \cdot i_{r\alpha} + M \cdot i_{r\beta}).\end{aligned}\quad (3)$$

Рівняння електромагнітного моменту АД має вигляд:

$$M_{EM} = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot M \cdot \left[ (i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\alpha}) \right] \quad (4)$$

Рівняння руху для валу АД при одномасній механічній частині:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{EM} - M_C) \quad (5)$$

де  $J$  – момент інерції мас, що обертаються на валу ротора.

В загальному випадку рівняння (5) можна записати як:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{EM} - M_C(t, \omega, \theta_r)) = \frac{M_{дин}}{J} \quad (6)$$

$M_{дин}$  – динамічний момент на валу АД.

В рівняннях (1) – (6) використовуються такі значення:

$$r_{s\alpha} = r_{s\beta} = r_{s\gamma} = 0,055, Ом,$$

$$r_{r\alpha} = r_{r\beta} = r_{r\gamma} = 0,015, Ом,$$

$$L_{s\alpha} = L_{s\beta} = L_{s\gamma} = 0,0143, Гн,$$

$$L_{r\alpha} = L_{r\beta} = L_{r\gamma} = 0,0141, Гн$$

$L_\mu = 0,02, Гн$  – повна індуктивність фази обмотки статора від основного магнітного потоку, що враховує наявність струмів в інших фазах (індуктивність від основного магнітного потоку, яка створена самою обмоткою  $M$ , і індуктивність від частини основного потоку, що створена двома іншими обмотками статора  $\frac{M}{2}$ ).

$$M = \frac{2}{3} \cdot L_{\mu} = \frac{2}{3} \cdot 0.02 = 0.0133, \text{ мГн} - \text{взаємна індуктивність фази обмоток ротора і}$$

статора асинхронного двигуна при співпадінні їх осей або індуктивність обмотки статора від основного магнітного потоку, розрахована при відсутності струмів в інших фазах статора і обмотках ротора (тобто, від частини основного магнітного потоку, створеного самою фазою статора).

На основі рівнянь (1) – (7) в програмному середовищі Simulink пакета MATLAB будуємо модель (рис. 3).

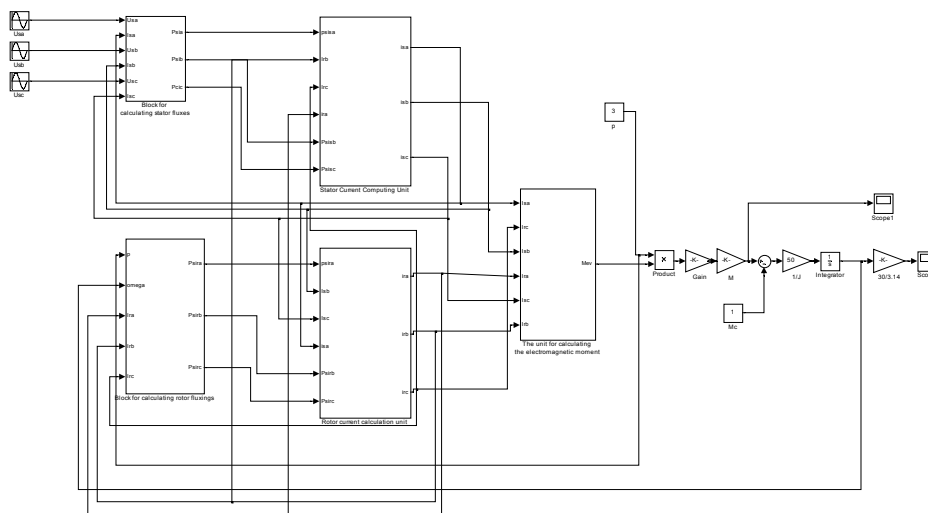


Рис. 3. Модель мотор-вентилятора, виконана в програмному середовищі Simulink пакета MATLAB

Тут Stator current calculation unit – блок обчислення статорних струмів, що реалізує перші три рівняння (1);

Rotor current calculation unit – блок обчислення роторних струмів, що реалізує четверте – шосте рівняння (1);

Block for calculating the flow of the stator – блок обчислення потокозчеплення статора, що реалізує рівняння (2);

Block for calculating the flow of the rotor – блок обчислення потокозчеплення ротора, що реалізує рівняння (3);

The unit for calculating the electromagnetic moment – блок обчислення електромагнітного моменту, що реалізує рівняння (4).

Криві перехідного процесу для електромагнітного моменту (рис. 4) та обертів вала двигуна (рис. 5) за формою співпадають з аналогічними кривими [1], [2], [3]. Це говорить про адекватність розробленої моделі.

Слід зазначити, що статичний момент на валу двигуна вибраний некоректно, оскільки не розроблено математичну модель самого вентилятора.

Дослідження роботи мотор-вентилятора в несиметричних режимах і при несинусоїдальній напрузі живлення буде зроблене після розробки математичної моделі фазозчеплювача, мотор-компресора, мотор-насоса та підключення їх до тягового трансформатора. Модель «тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привід електровоза серії ВЛ80<sup>Т, К</sup>» розроблена в роботі [4].

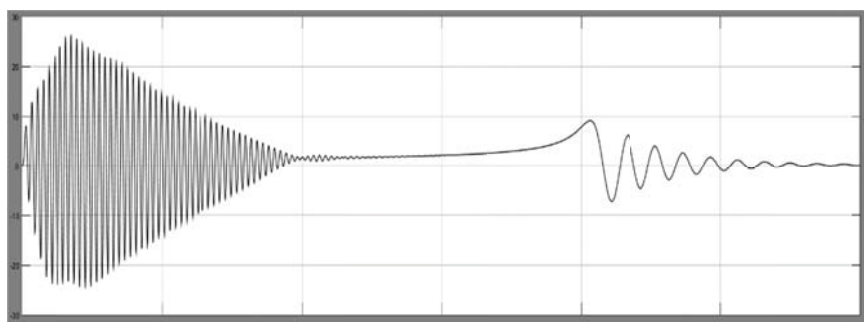


Рис. 4. Криві перехідного процесу для електромагнітного моменту

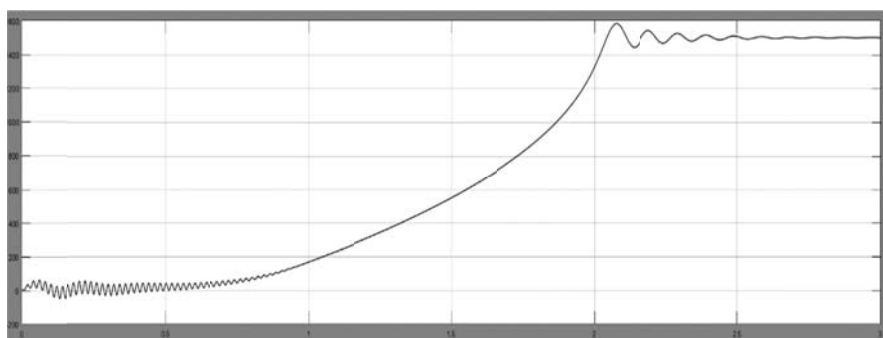


Рис. 5. Криві перехідного процесу обертів вала двигуна

**Висновки та пропозиції.** Розглянуто принцип побудови мотор-вентилятора, що працює в системі допоміжних машин електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup>, в режимах несиметрії фазних напруг та при та несинусоїдальній напрузі живлення і перевірено її на адекватність.

1. Обґрунтовано вибір моделі мотор-вентилятора електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup>, що працює в режимах несиметрії фазних напруг та при та несинусоїдальній напрузі живлення.

2. Побудовано модель в програмному середовищі Simulink пакета MATLAB.

3. Побудовані криві перехідного процесу для електромагнітного моменту та обертів вала двигуна, що за формою співпадають з аналогічними кривими асинхронних двигунів. Це говорить про адекватність розробленої моделі.

4. Запропоновано розроблену математичну модель використовувати як базову при побудові моделей фазорозчіплювача, мотор-компресора, мотор-насоса для дослідження роботи приводу допоміжних машин електровозів серії ВЛ80<sup>Т,К</sup> при роботі в режимах несиметрії фазних напруг та при та несинусоїдальній напрузі живлення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чиликин М.Г. и др. Основы автоматизированного электропривода. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
2. Пусоветов М., Солтус К., Сенявский И. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. – LAP LAMBERT. Academic Publishing, 2013. – 199 с.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин; Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с: ил.

4. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К. Модель системи «Тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привід електровоза серії ВЛ-80 Т, К». – Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету серія «Транспортні системи і технології» випуск 28. – К., ДЕТУТ, 2016. – С. 99–109.

5. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе контактная сеть – электровоз. Электричество. – 2001. – № 10.

**Sergey Gulak,**

*(Senior lecturer in «Traction rolling stock of railways», the State Economic and Technological University of Transport)*

**Edward Ermolenko,**

*(Graduate student of «Traction rolling stock of railways», the State Economic and Technological University of Transport)*

**Andrew Hayur,**

*(Senior lecturer in «Traction rolling stock of railways», the State Economic and Technological University of Transport)*

**Alexander Sidorenko**

*(Student gr. 3-EM, State Economic and Technological University of Transport)*

#### MODEL MOTOR FAN-ELECTRIC LOCOMOTIVES VL-80K IN ASYMMETRY WINDINGS AND NON-SINUSOIDAL VOLTAGE

*The article reviewed and tested principles of constructing a model of induction motor 92-4 AE-used for electric locomotives VL-80<sup>K, T</sup> as motor – fan in the windings asymmetry and non-sinusoidal voltage. The choice of the mathematical model by which described the motor – fan in these modes, designed and built the parameters of the model in the software environment Simulink software package MATLAB. Built transition curves for electricity and for the moment magnetic shaft speed induction motor, in which the tested model motor – fan on adequacy. The above simulation about the possibility of further auxiliary equipment (Phase separator, motor – compressor and motor – pump) to study these modes of asynchronous motors on overall power factor of electric drive auxiliary machinery series VL80<sup>T, K</sup> and develop methods to improve power factor. As a basic model of an induction motor, a motor-fan model will be used.*

**Keywords:** Model motor fan,  $\alpha, \beta, \gamma$  - coordinates, asymmetry phase voltages, non-sinusoidal voltage, threading rotor, stator threading, power factor.

#### REFERENCES

1. MG Чылыкын і др. Основы автоматизированного электропривода. Учебное пособие для вузов. – М.: Energy, 1974. – 568 с.

2. М. Пушоветов, К. Солтус, І. Сенявський. Комп'ютерне моделювання асинхронних машин і трансформаторів. – LAP LAMBERT. Academic Publishing, 2013 – 199 с.

3. Копылов І. Р. Математические модели электрических машин; Учеб. пособ. – 3-е изд., Перераб і доп. – М.: Высш. Школа. 2001. – 327 с: іл.

4. С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко. Модель «Трансформаторна підстанція - контактна мережа – тяговий привід електровоза ВЛ-80 серії Т, К». – Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту «Транспортні системи і технології» Випуск 28 – К., 2016. ДЕТУТ – 99-109 с.

5. Савоскин А.Н. Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математические модели электромагнитных процессов в динамической системе контактная сеть-электровоз. Электричество. – 2001. № 10.