

УДК 621.313:8

**Сергій Гулак**

*(старший викладач кафедри «Тяговий рухомий склад», Державний університет інфраструктури та технологій)*

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ**

*Розглянуто принцип роботи трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та проаналізовані теоретичні основи перетворення електричної енергії в електромеханічних перетворювачах електромагнітного типу. Запропоновано модель фізичних процесів, яка характерна для більшості електричних машин, що в подальшому може бути використана для отримання характеристик, які описують динаміку електричних машин. Розроблені вимоги до магнітної системи і фазних зон моделі.*

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, модель фізичних процесів, фазні зони.

**Вступ.** Пошук ефективних методів отримання характеристик, які описують динаміку електричних машин, дослідження режимів роботи електричних машин для конкретних технічних рішень вимагає обґрунтованого вибору найбільш доцільного для даного випадку методу математичного моделювання зазначених електричних машин. При побудові математичної моделі асинхронної електричної машини треба враховувати, що така модель повинна припускати можливість врахування низки припущень. У першу чергу слід вважати, що система напруг живлення асинхронного двигуна є симетричною і синусоїдальною, а обмотки статора та ротора є симетричними. Також необхідно припустити, що статор та ротор асинхронної машини є гладкими.

Математична модель за допомогою математичних рівнянь описує динаміку роботи асинхронної електричної машини. Тобто, вона математично реалізує фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині під час її роботи. Крім того, математична модель може бути використана для аналітичного визначення параметрів асинхронного двигуна, які не можна визначити за допомогою каталожних або довідкових даних. Для цього слід правильно описати фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній електричній машині та розробити вимоги до магнітної структури і розташування фазних зон в узагальненій фізичній моделі асинхронного двигуна. Також важливою задачею при моделюванні є вибір системи координат, в якій будуть записані системи рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна.

© Гулак С.О., 2018

Роботи, присвячені моделюванню асинхронних машин [1-6], свідчать про те, що велике розповсюдження отримали методи моделювання асинхронних машин при умові симетрії обмоток статора та ротора та симетрії і синусоїдальності системи напруг живлення, хоча реальна система напруг живлення є несиметричною і несинусоїдальною, а обмотки статора та ротора асинхронного двигуна не завжди є симетричними. Математичні моделі, отримані за допомогою цих методів, дозволяють дослідити динамічні процеси асинхронних двигунів за умови якісної електричної енергії та симетрії обмоток машини. Це свідчить про те, що дослідження, присвячені розробці моделей асинхронних двигунів з несиметричними обмотками та при роботі від джерела несиметричної та несинусоїдальної напруги, а також розробці методик визначення параметрів асинхронного двигуна, що використовуються в цих моделях, є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** В дослідженні [7] показано, що пошук оптимальної моделі асинхронного електричного двигуна викликає необхідність врахування роботи даного електричного двигуна в умовах неякісної електричної енергії. В роботі також проаналізовано найбільш відомі моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та показано, що єдиною моделі, яка дозволяє оцінити енергетичну ефективність електричної машини, яка працює в умовах неякісного живлення, тобто, що враховує всі показники якості електричної енергії одночасно, не існує. Однак є моделі, які відображають вплив окремих показників якості напруги живлення на роботу асинхронного двигуна. Так, найбільш розповсюджена модель асинхронного двигуна приведена в роботі [8]. Це просторова модель трифазної ідеалізованої машини має низку припущень: машина двополюсна, має гладкий повітряний проміжок, всі її параметри лінійні, напруга синусоїдальна. В даній системі координат індуктивності, взаємні індуктивності в рівнянні для потокощеплення є періодичними коефіцієнтами. Для усунення цього здійснюється перехід до загальмованих систем координат, де кругове поле в повітряному проміжку зображають результуючими векторами. Рівняння, що відповідають даній моделі в координатах  $\alpha, \beta, \gamma$  є нерухомими відносно статора. Дану модель, як подано в [7], доцільно застосовувати для дослідження асинхронної електричної машини в динамічному режимі при синусоїдальній напрузі живлення. Недоліком такої моделі є те, що вона розрахована на живлення асинхронного двигуна від симетричної системи синусоїдальної напруги. При несиметрії напруг з'являється необхідність розкладати їх на нульову, пряму і зворотну послідовності і розглядати момент на валу як суму від кожної з цих послідовностей. Таким чином, для аналізу роботи асинхронного двигуна в умовах живлення неякісною електроенергією необхідне істотне ускладнення початкової моделі.

Також в роботі [7] зазначається, що в даній час використовуються два види математичних аналогів асинхронних двигунів: на базі узагальненої двофазної асинхронної машини  $\alpha - \beta$ ,  $d - q$ , а також  $x - y$  і в природних трифазних осях на основі фазних і лінійних напруг. Зазначено, що моделі  $d - q$ , а також  $x - y$  жорстко прив'язані до швидкості поля статора або ротора і про можливість їх застосування тільки у випадку живлення статора лише синусоїдальною напругою.

Особливої уваги заслуговує метод симетричних складових, в якому система несиметричних напруг статора, зображується як сума прямої і зворотної послідовності. Для кожної фази двигуна реалізується Т-подібна схема заміщення як

для прямої, так і для зворотної послідовностей. Результируючий момент визначається як сума моментів прямої і зворотної послідовності всіх трьох фаз. Також заслуговує уваги математичний аналог асинхронного двигуна, в якому досліджується робота машини при несиметричній несинусоїдальній напрузі у встановленому режимі. В цьому методі виконується заміна диференціальних рівнянь асинхронної машини в осях  $\alpha - \beta - 0$  комплексними. Після цього вводяться складові прямої і зворотної послідовностей напруги струму по осях  $\alpha$  і  $\beta$ . Виконаний перехід від диференціальних рівнянь відносно напруг трифазної машини в осях  $\alpha - \beta - 0$  до комплексних рівнянь відповідає загальновідомим схемам заміщення. Після попереднього розрахунку струмів визначається значення середнього за період електромагнітного моменту. В результаті розраховується значення коефіцієнта корисної дії машини та коефіцієнта потужності. Розглянута модель дозволяє виконати аналіз енергетичної ефективності асинхронного двигуна при несиметричній несинусоїдальній напрузі в мережі живлення, але вимагає визначеного доопрацювання, оскільки вона крім розгляду тільки статистичних режимів аналогічно попередній не враховує, і часто, напруги живлення.

Виходом із ситуації, що склалась, є створення імітаційної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи як обчислювальні блоки, елементи моделей, описаних вище. Їх з'єднання дозволить врахувати всі показники якості електроенергії одночасно, але при цьому визначення параметрів схеми заміщення електромеханічного перетворювача розрахунковим шляхом можливе при незмінній частоті напруги живлення. Якщо ж вона буде змінюватись, то вищеозначене можливе тільки на основі проведення відповідного експерименту.

При побудові кожної з проаналізованих вище моделей асинхронного двигуна необхідна своя система параметрів двигуна і, відповідно, й своя методика визначення цих параметрів.

У роботі [9] наведена класифікація методів визначення параметрів асинхронних двигунів. Але, запропоновані в даній роботі методики, не враховують прив'язку до конкретного часового проміжку роботи асинхронного двигуна. Це призводить до того, що при спробі застосування зазначених методик для визначення параметрів асинхронного двигуна при живленні від несиметричної несинусоїдальної системи напруг виникають деякі труднощі. Вони пов'язані з тим, що індуктивності статорної обмотки гармонійно залежать від кута між фазними струмами статора і ротора. Цей кут в умовах неякісної системи напруг живлення є змінним. Це накладає визначені обмеження на використання запропонованих в [9] рішень.

Розвиток поглядів на визначення параметрів асинхронного двигуна на основі інформації про фазні струми та напруги може бути знайдений в роботі [11], в якій наведено математичні зв'язки між параметрами асинхронного двигуна та його фазними струмами і напругами для моделі узагальненої двофазної асинхронної машини в  $\alpha - \beta$ ,  $d - q$  координатах. Не дивлячись на очевидно правильну постановку вирішення проблеми щодо визначення параметрів асинхронного двигуна та рекомендації щодо застосування математичного апарату, сам математичний апарат та алгоритм його застосування для визначення параметрів двигуна наведені в роботі [10] лише концептуально. Автори роботи обмежуються лише загальним наведенням математичного апарату. Крім того, як було зазначено

вище, моделі в  $d-q$ , а також  $x-y$  координатах жорстко прив'язані до швидкості поля статора або ротора і їх можливо застосовувати тільки у випадку живлення статора лише синусоїдальною напругою.

Систематизація результатів проведених досліджень дозволяє вважати, що існуючі підходи до вирішення проблеми моделювання асинхронних двигунів спираються на припущення, що обмотки асинхронних двигунів симетричні. Іншими словами, припускається, що асинхронний двигун є симетричним навантаженням для трифазної системи живлення, причому цей висновок справедливий як для симетричної, так і для несиметричної систем живлення. Очевидно, подібні підходи дозволяють знаходити оптимальне рішення тільки в тому випадку, якщо відомі такі каталожні параметри асинхронної машини, як активні опори обмоток статора і ротора та власні й взаємні індуктивності цих обмоток. Крім того, аналіз результатів проведених досліджень свідчить, що методика розрахунку цих параметрів для схем заміщення справедливий тільки для асинхронних двигунів з симетричними обмотками. З цього випливає, що порушення умов симетрії обмоток тягового двигуна не дасть можливості отримання рішень для асинхронних двигунів з несиметричними обмотками. Дана проблема може бути вирішена шляхом розробки методу розрахунку взаємної і власної індуктивності асинхронного двигуна з несиметричними обмотками, що дозволить виразити зазначені індуктивності через геометричні розміри відповідних обмоток. Для цього при описі фізичних процесів слід виразити параметри асинхронного двигуна через геометричні розміри його обмоток.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є надання методичних рекомендацій при описанні фізичних процесів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричних обмотках електричної машини. Дана модель фізичних процесів в подальшому може бути використана для розробки методу розрахунку взаємних і власних індуктивностей обмоток асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у разі несиметрії обмоток статора і ротора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- обґрунтувати вибір моделі процесів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для опису фізичних процесів, що відбуваються в електричній машині;
- розробити вимоги до магнітної структури і розташування фазних зон в узагальненій фізичній моделі асинхронного двигуна.

**Матеріали та методи дослідження.** В даній статті буде розглядатись лише трифазна електрична машина. При аналізі ідеалізованої структури електричної машини особливу увагу слід приділити перетворенню енергії і, відповідно, створенню в машинах обертового моменту. В загальному випадку електрична машина складається з двох груп обмоток або котушок, одна з яких може обертатись відносно іншої. Відносний рух двох груп котушок обмежений одним ступенем свободи, причому в більшості випадків можливим є обертовий рух. Відповідно буде розглядатись досить загальний тип обертових машин, що називається узагальненим обертовим електромеханічним перетворювачем електроенергії електромагнітного типу, або простіше, узагальненою машиною. Ця машина складається з двох концентричних циліндрів з ярко вираженими магнітними полюсами на одному з них. На кожній з магнітних поверхонь розташовані три синусоїдальних шара зсунутих один відносно одного на 120 електричних градусів.

Подібна геометрична конфігурація характерна для більшості електричних машин і тому ця модель буде використана для отримання характеристик, що описують динаміку електричних машин.

Розгляд електричних машин в статті оснований на фундаментальному припущенні, що машини можуть бути зображені системами лінійних ланцюгів із зосередженими параметрами, які рухаються одна відносно одної. Оскільки два елементи електричної машини (статор – нерухомий елемент, ротор – елемент, що обертається) знаходяться у відносному русі, виникає питання про вибір доцільної системи координат для запису рівнянь руху. Існує деяка свобода вибору координатної системи для вивчення будь-яких специфічних пристроїв, і цей вибір зазвичай диктується конкретною задачею і бажаною формою рівнянь руху. При виборі функції Лагранжа для запису рівнянь руху слід використовувати істинні координати [11].

Електромеханічні перетворення енергії в перетворювачах електромагнітного типу здійснюється завдяки перетворенням зміни запасу магнітної енергії при зміні механічного положення. В системах з однією струмонесучою котушкою ця зміна запасеної енергії викликається зміною картини магнітного поля в процесі механічного руху. Якщо при зміні положення конфігурація магнітного поля не змінюється, повинна існувати зміна у відносному положенні двох або більше струмонесучих котушок. Таким чином можна побудувати електромеханічні перетворювачі енергії з однією або декількома струмонесучими котушками, що живляться від одного або декількох незалежних джерел.

На практиці використовують різні способи побудови електричних машин, один з яких зображений на рис. 1.

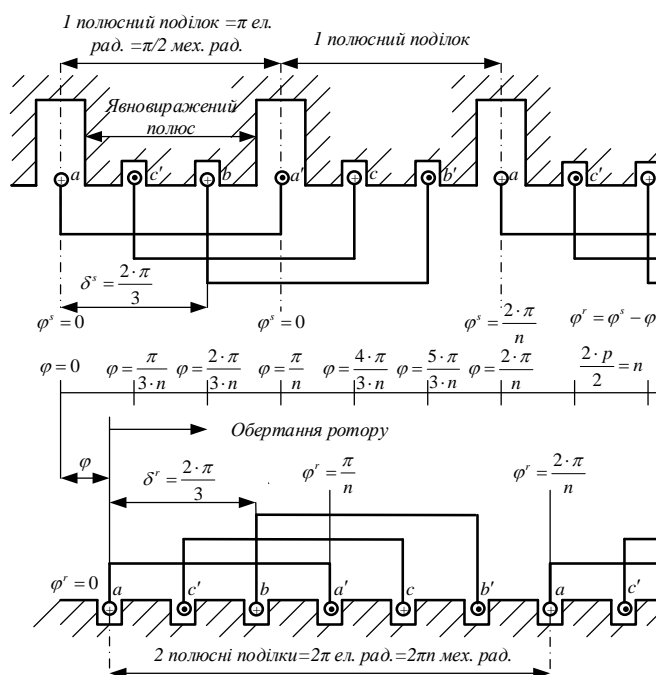


Рис. 1. Явнополюсна машина, що має три осі і 2р полюси

Машина, що розглядається, складається з шести груп зосереджених котушок (показано по одній котушці на групу), які називаються фазовими зонами. Три з цих фазних зон розташовуються в пазах нерухомої магнітної системи, що називається статором, три інші – в пазах магнітної системи, яка обертається - називається ротором. Для задач аналізу границі магнітної системи і обмотки фаз, що показані на рис. 1 зосередженими, будуть зображені в вигляді неперервної структури, зображеної на рис. 2. Тут фазовими зонами є синусоїдально розподілені провідні шари, а виступи полюсів статора зображені радіальною провідністю, яка змінюється в функції кута.

Передбачається, що магнітна структура і розташування фазових зон в узагальненій фізичній моделі (рис. 2) повинні задовольняти таким умовам [10]:

1. Електричний просторовий кут  $\varphi_{el}$  і механічний просторовий кут  $\varphi$  зв'язані співвідношенням:

$$\varphi_{el} = p \cdot \varphi = n \cdot \varphi, \quad (1)$$

де  $\varphi_{el}$  - кут в електричних просторових радіанах;

$\varphi$  - кут в механічних просторових радіанах;

$p$  - число пар полюсів машини;

$n$  - число періодів просторового розподілу струмового шару.

Полюс може бути визначений як область, в якій існує радіальний магнітний потік одного напрямку, або як півперіод синусоїдального струмового шару. Один полюсний поділок дорівнює одній фазовій зоні і містить  $\pi$  електричних просторових радіан. Число полюсів повинне виражатись парними числами; кожна пара полюсів складається з одного південного і одного північного полюсу.

2. На кожен полюс припадають дві фазні зони на статорі і дві на роторі (відповідно до числа фаз машини). Передбачається, що фазна зона створює густину струму, синусоїдально розподілену в просторі. Синусоїдально розподілений струмовий шар створюється, якщо витки в фазній зоні синусоїдально розподілені в просторі і поділок складає  $\pi$  електричних просторових радіан. Передбачається, що в узагальненій моделі витки синусоїдально розподілені в просторі, так що струм  $i$ , підведений до затискачів фазної зони, створює поверхневу густину струму

$K(\varphi) = i \cdot Z \cdot \cos n \cdot \varphi$ , де  $Z = \frac{w}{l}$  - лінійна густина провідника струмового шару,  $w$  - кількість витків обмотки,  $l$  - довжина обмотки.

3. Фазні зони як статора так і ротора зсунуті зміщені в просторі на 120 електричних градусів тобто, магнітні осі фазних зон зсунуті на  $\frac{2\pi}{3}$  електричних

радіан, або на  $\frac{2\pi}{3n}$  механічних радіан.

4. Повітряний зазор є областю простору між магнітними системами статора і ротора. Передбачається, що одна сторона повітряного проміжку є магнітно «гладкою», а інша має магнітну нерівномірність (полюсні виступи), що періодично

повторюються через  $\pi$  електричних просторових радіан, або через  $\frac{\pi}{2}$  механічних радіан.

5. Як впливає з попередньої умови, не розглядається така магнітна нерівномірність в повітряному проміжку, що створюється пазами, які використовуються в реальних машинах для розміщення обмоток. Це не виключає магнітної рівномірності на одній із сторін повітряного проміжку, що повторюється через кожні  $\pi$  електричних просторових радіан, оскільки ця нерівномірність, характерна для явнополюсних машин, не протирічить умові 4.

6. При визначенні напруженості в явнополюсних машинах повітряний проміжок буде передбачатись рівномірним, що має величину  $g$ , яка дорівнює середній величині повітряного проміжку для явнополюсної структури. Нерівномірність повітряного проміжку буде тоді враховуватись в ідеалізованій моделі за допомогою радіальної магнітної проникності, що змінюється в просторі:

$$\mu_{rad} = \mu - \mu_2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \varphi^s) \quad (2)$$

7. Передбачається, що фазні зони зв'язані з колекторами або контактними кільцями і всі їх параметри та живлення будуть визначатись відносно затискачів, нерухомих відносно відповідного елемента магнітної системи. Таким чином затискачі фазних зон ротора нерухомі в просторі відносно ротора, але обертаються в просторі відносно статора.

8. Кожна з трьох фазних зон, розташованих на статорі, має різну кількість витків. Роторні фазні зони мають також різну кількість витків.

9. Магнітний матеріал ротора і статора має лінійну характеристику намагнічування з дуже високою магнітною проникністю. Передбачається, що насичення відсутнє. Це припущення робить всі зосереджені електричні параметри незалежними від електричних змінних, але параметри можуть бути функціями механічних змінних.

10. Запасена електрична енергія, що використовується для опису машини, розглядається лише як енергія поля нульового порядку або енергія статичного магнітного поля. Енергією електростатичного поля нехтують, що дозволяє не враховувати вплив ємностей всередині обмоток і між ними. Всі електричні поля, які створюються зміною в часі магнітних полів або відносним рухом в магнітному полі, не входять в енергетичну функцію, що описує систему. Ці електричні поля з'являються при виведенні рівнянь руху з енергетичної функції системи, записаної для енергії магнітного поля.

**Висновки.** Запропоновані методичні рекомендації до вибору моделі фізичних процесів асинхронного двигуна дозволяють врахувати особливості перетворення енергії в такому електромагнітному перетворювачі яким є асинхронна електрична машина, скласти математичні рівняння, що описують ці перетворення для аналізу динаміки роботи двигуна, та вибрати координатну систему. Також методичні рекомендації дозволяють вирішити важливу задачу по вибору системи координат, в якій будуть записані системи рівнянь роботи асинхронного двигуна.

Вимоги до магнітної структури і розташування фазних зон в узагальненій моделі фізичних процесів асинхронного двигуна дозволяють в подальшому аналітичним методом розрахувати параметри математичної моделі асинхронного двигуна, що не можуть бути визначені за каталожними та довідковими даними.

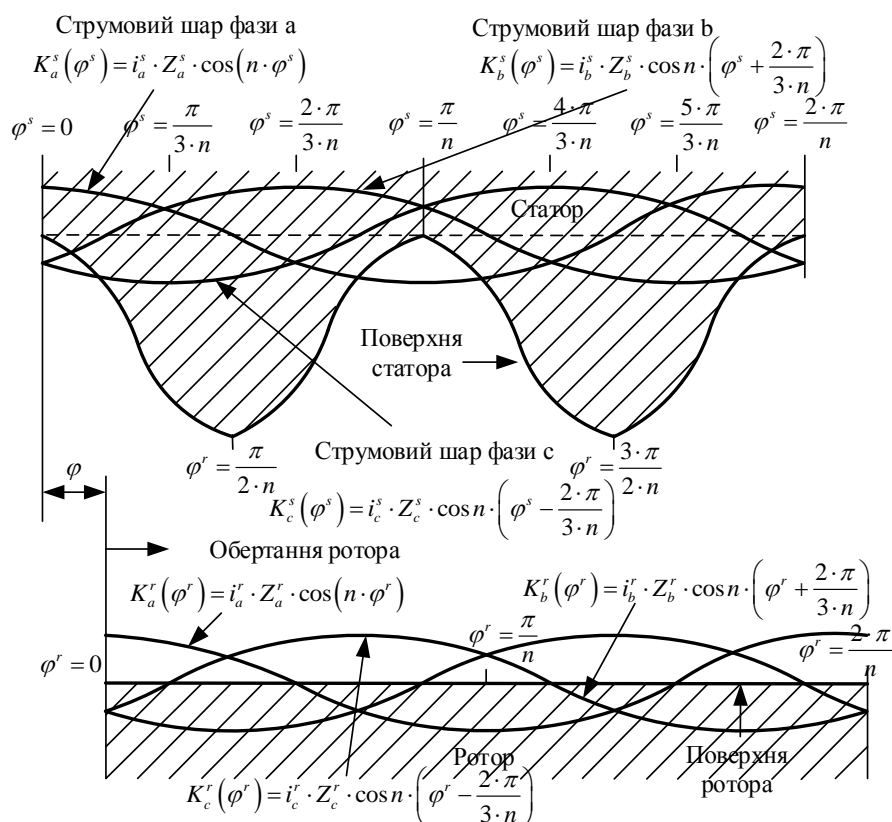


Рис. 2. Струміві шари, створені синусоїдально розподіленими котушками в узагальненій машині

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ruan J.-Y., Wang S.-M. Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect/J.-Y. Ruan, S.-M. Wang//IEEE Transactions On Power Electronics. – 2016. - Vol.: 31, №. 1. – P. 497-506. - Available at: www.ieee.org.
2. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque/C P Chioncel, G O Tirian, N Gillich, E Raduca// International Conference on Applied Sciences – 2015. P. 1 – 6. - DOI:10.1088/1757-899X/106/1/012005.
3. Pakkiraiah B., Sukumar G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive/B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar// Indian Journal of Science and Technology. -2016 – Vol.: 9(45). –P. 1 -10. - DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i45/105313.
4. Guo Z., Zhang Q.-wei. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss /Z. Guo, Q.-wei Zhang //Journal of Physics: Conf. Series 1060. – 2018. – P. 1 – 6. - DOI:10.1088/1742-6596/1060/1/012085.



5. Demytyev Y.N., Umurzakova A.D. The Engine Mechanical Coordinates Measuring In The Asynchronous Motor/Y.N. Demytyev, A.D. Umurzakova//MATEC Web of Conferences. – 2014. – P. 01027-p.1 - 01027-p.6. - DOI: 10.1051/ mateconf/20141901027.
6. Balara D., Timko J., Zilkov J., A. M. Le so. Neural Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor/D. Balara, J. Timko, J. Zilkov, A. M. Le so// Neural Network World – 2017, №3. – P. 259 – 270. - DOI: 10.14311/NNW.2017.27.013.
7. Кузнецов В.В., Николенко А.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / В.В. Кузнецов, А.В. Николенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2015. – Т.1, №8(73). – С. 37 – 42. - DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755.
8. Пусоветов М., Солтус К., Сенявский И. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов/ М. Пусоветов, К. Солтус, И. Сенявский // LAP LAMBERT. Academic Publishing. - 2013 – 199 с.
9. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Храмин П.Я. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных двигателей/ Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова, Р.Я. Храмин // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. - 2016. – Т. 3, №1. – С. 36 – 40.
10. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К., Усватов М. О., Черних Ю. М. Визначення динамічних змінних узагальненого асинхронного двигуна / С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Ю.М. Черних, М.О. Усватов // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 29. – К.: ДЕТУТ, 2016. – С. 143 – 153.
11. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. 3D permeance model of induction machines taking into account saturation effects and its connection with stator current and shaft speed spectra/J. Martinez, A. Belahcen, A. Arkkio IET Electric Power Applications. – 2015. – P. – Vol. 9, Is. 1. - 20 – 29. - DOI: 10.1049/iet-epa.2014.001.

## REFERENCES

1. Ruan, J. Y., & Wang, S. M. (2016). Magnetizing curve estimation of induction motors in single-phase magnetization mode considering differential inductance effect. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 497-506.
2. Chioncel, C. P., Tirian, G. O., Gillich, N., & Raduca, E. (2016). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 106, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
3. Pakkiriiah, B., & Sukumar, G. D. (2016). A new modified artificial neural network based MPPT controller for the improved performance of an asynchronous motor drive. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45).
4. Guo, Z., & Zhang, Q. W. (2018, July). The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1060, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
5. Demytyev, Y. N., & Umurzakova, A. D. (2014). The engine mechanical coordinates measuring in the asynchronous motor. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 19, p. 01027). EDP Sciences.
6. Balara, D., Timko, J., Žilková, J., & Lešo, M. (2017). Neural networks application for mechanical parameters identification of asynchronous motor. *Neural Network World*, 27(3), 259.
7. Kuznecov, V. V., & Nikolenko, A. V. (2015). On models of asynchronous motor operation in conditions of poor-quality electricity. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*, (1 (8)), 37-42.
8. Pustovetov, M. YU., Soltus, K. P., & Sinyavskij, I. V. (2013). Computer simulation of induction motors and transformers.
9. Mugalimov, R. G., Hramshin, R. YA., & Mugalimova, A. R. (2016). Comparative analysis of methods for calculating the parameters of the electrical equivalent circuit of asynchronous motors. *EHlektrotekhnika: setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal*, 3(1), 36-40.
10. Goolak, S. O., Yermolenko, E. K., Usvatov, M. O., & Chernih, YU. M. (2016). Determination of generalized dynamic variable induction motor. *Zbirnik naukovih prac' Derzhavnogo ekonomiko-tekhnologichnogo universitetu transportu. Seriya: Transportni sistemi i tekhnologii*, (29), 143-153.
11. Martinez, J., Belahcen, A., & Arkkio, A. (2014). 3D permeance model of induction machines taking into account saturation effects and its connection with stator current and shaft speed spectra. *IET Electric Power Applications*, 9(1), 20-29.

**Сергей Гулак**  
(старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав»,  
Государственный университет инфраструктуры и технологий)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МОДЕЛИ  
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ**

**ДВИГАТЕЛЕ**

*Рассмотрены принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и проанализированы теоретические основы преобразования электрической энергии в электромеханических преобразователях электромагнитного типа. Предложена модель физических процессов, которая характерна для большинства электрических машин, в дальнейшем может быть использована для получения характеристик, описывающих динамику электрических машин. Разработанные требования к магнитной системе и фазным зонам модели.*

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, модель физических процессов, фазные зоны.

**Sergey Goolak**  
(Senior Lecturer of the «Traction Rolling Stock Department» at State University  
of Infrastructure and Technologies)

**METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR THE APPLICATION OF  
THE MODEL OF PHYSICAL PROCESSES  
IN THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR**

*The principle of operation of a three-phase asynchronous motor with a short-circuited rotor is considered and the theoretical bases of the transformation of electric energy in electromechanical converters of an electromagnetic type are analyzed. In order to construct a mathematical model of an asynchronous motor with a short-circuited rotor for obtaining characteristics to describe the dynamics of electrical asynchronous machines, the physical configuration, which is typical for most electric machines, is proposed. An approach to choose a coordinate system has been developed in which the system of equations describing the operation of the asynchronous motor would be described. Requirements for the magnetic system and phase zones of the model have been developed, which in the future can be used to determine the parameters of the mathematical model of the asynchronous motor, which cannot be determined by the catalog and reference data. In developing the requirements for the magnetic system and phase zones, it is taken into account that windings of the asynchronous motor can be both symmetric and asymmetric. The developed requirements can be used to develop a method for analytical determining the parameters of an asynchronous motor, which will allow the specified parameters to be determined as a function of the geometric dimensions of the windings of the engine.*

**Keywords:** electromagnetic converter, model of physical processes, phase zones.