

УДК 629.3.027.2

Агарков Іван Валентинович<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Аспірант, Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17 м. Харків, 61002, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-8766>

\*Автор, відповідальний за листування: [ivan.aharkov@gmail.com](mailto:ivan.aharkov@gmail.com)

## МОДЕЛЮВАННЯ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ПІДСИЛЮВАЧЕМ РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ

Проведено аналіз підсилювачів рульового приводу, які використовуються на сучасному рухомому складі. Визначено їх основні недоліки. Враховуючи вимоги щодо рульового керування троллейбусів запропоновано рішення його підвищення ефективності.

Грунтуючись на розробленій математичній моделі та функціональних схемах системи рульового керування троллейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться, створено імітаційну модель рульового керування троллейбуса з використанням пакету Matlab Simulink. Особливістю імітаційної моделі є врахування масогабаритних характеристик рухомого складу, параметрів підвіски керованої осі, впливу дорожнього покриття та швидкості руху троллейбуса, зміни параметрів магнітної системи ДПК під час роботи. Розраховано параметри двигуна з ротором, що котиться, який пропонується до використання як електропідсилювач рульового приводу троллейбуса ЛАЗ Е183Д1.

Проведено розрахунок магнітної системи двигуна методом кінцевих елементів з подальшою апроксимацією отриманих результатів. За допомогою розробленої імітаційної моделі проведено моделювання роботи системи рульового керування троллейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться при повороті керованих коліс на місці з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь. Отримано часові діаграми перехідних процесів у системі рульового керування троллейбуса та проведено їх обробку та аналіз.

**Ключові слова:** рульове керування, електропідсилювач, імітаційне моделювання, троллейбус, двигун з ротором, що котиться, магніторушійна сила.

**Вступ.** Міський електричний транспорт відіграє важливу роль у житті сучасних мегаполісів. Необхідність забезпечення населення мобільністю в рамках швидкого розширення території міст та приміських зон, а також зростання норм щодо екологічності та енергоефективності обумовлюють підвищення вимог як до рухомого складу в цілому, так і його окремих вузлів та агрегатів.

Наукові дослідження в Україні та світі спрямовані на розробку та впровадження технологій підвищення ресурсозбереження, для ефективної модернізації елементів і систем електричного транспорту, сьогодні є найбільш актуальними. Це сприяє підвищенню надійності, екологічності, енергоефективності та подовженню ресурсу роботи рухомого складу. Результатами такого підходу є зменшення енергетичних і технологічних витрат на виробництво рухомого складу, експлуатацію і ремонт його складових елементів.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Одним із науково-технічних напрямків є удосконалення системи рульового керування троллейбуса. Від його конструкції залежать компонувальні рішення та експлуатаційні властивості рухомого складу: стійкість і керованість коліс під час руху, оптимальне розміщення обладнання у підкузовному просторі троллейбуса, висока ремонтпридатність, енергоефективність, безпека та комфортабельність руху тощо.

На сучасних тролейбусах використовуються підсилювачі рульового приводу (РП) гідравлічного типу. Проведений аналіз [1] виявив їх основні недоліки:

неможливість тримати рульове колесо в крайньому положенні більше п'яти секунд, інакше відбудеться перегрів масла в системі, що призводить до її поломки;

необхідність частішого обслуговування: заміна рідини, слідкування за рівнем масла в системі, перевірка стану приводів, цілісність шлангів і насоса підсилювача;

робота насоса гідропідсилювача безпосередньо пов'язана з двигуном. Під час роботи таких елементів насос постійно відбирає у мотора частину потужності, яка при прямолінійному русі (гідропідсилювач не задіяний) витрачається даремно;

неможливість налаштувати режими роботи механізму залежно від умов руху.

З урахуванням недоліків існуючих підсилювачів РП, а також вимог щодо рульового керування тролейбусів, запропоновано рішення підвищення енергоефективності та ресурсозбереження підсилювачів РП тролейбусів за рахунок використання електропідсилювача керма на базі електродвигуна з ротором, що котиться (ДРК).

**Мета роботи.** Дослідження роботи підсилювача РП тролейбуса на базі електродвигуна з ротором, що котиться, у системі рульового керування тролейбуса ЛАЗ Е183D1.

#### **Задачі дослідження:**

створити імітаційну модель системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК;

провести розрахунок ДРК для системи рульового керування тролейбуса, визначити його електромагнітні та механічні характеристики;

провести дослідження роботи системи рульового керування тролейбуса з електропідсилювачем РП на базі ДРК за різних умов повороту рульового колеса шляхом цифрового моделювання.

#### **Реалізація імітаційної моделі системи рульового керування тролейбуса**

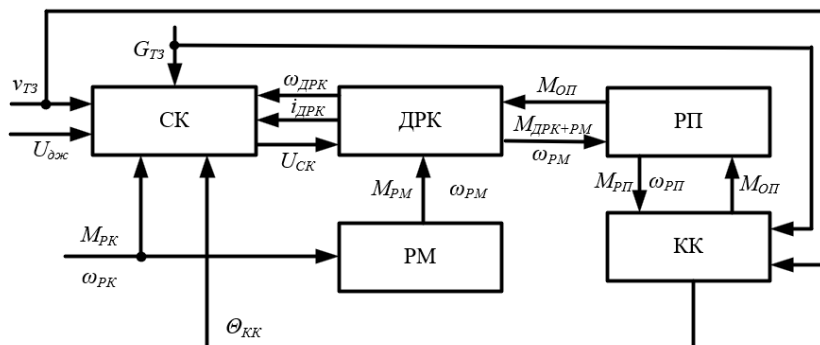
Розробка та модернізація нових елементів конструкції рухомого складу вимагає глибокого вивчення динамічних процесів. Вони відбуваються в електричних та механічних вузлах і системах та мають вплив на поведінку один одного.

Дослідження, які пов'язані з натурними експериментами, збільшують фінансові витрати, терміни розробки, а інколи не дозволяють провести всебічний аналіз процесів системи, що досліджується. В таких випадках доцільним є використання методів імітаційного моделювання. Особливо це актуально під час дослідження параметрів нетрадиційних елементів конструкції рухомого складу. Такі методи використовуються у роботі для дослідження параметрів двигуна з ротором, що котиться, у системі рульового керування тролейбуса. Як середовище для створення імітаційної моделі обрано програмне забезпечення блочного візуально-орієнтованого моделювання Simulink, який разом з математичним пакетом Matlab забезпечує широкий набір можливостей для дослідження та аналізу системи.

Конструкція системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК має у своєму складі елементи, які функціонально незалежні один від одного. Структурна схема такої системи зображена на рис. 1.

Структурна схема (рис.1) характеризує взаємодію елементів системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК. Система керування СК отримує живлення від джерела напруги  $U_{дж}$ . Проводячи опитування датчиків швидкості руху транспортного засобу  $v_{ТЗ}$ , наповненості салону  $G_{ТЗ}$ , кутової швидкості обертання ДРК  $\omega_{ДРК}$ , струмів фаз ДРК  $i_{ДРК}$ , моменту прикладеного до рульового колеса  $M_{РК}$ , частоти обертання рульового колеса  $\omega_{РК}$ , кута повороту керованих коліс  $\theta_{КК}$  система керування СК у режимі реального часу формує керуючі імпульси напругу  $U_{СК}$  для кожного полюсу ДРК за заданим законом керування. Електричний двигун ДРК механічно пов'язаний з рульовим приводом РП та рульовим механізмом РМ. Через передаточне відношення рульового механізму РМ частота обертання рульового колеса та момент, що прикладений водієм передаються на вихідний вал ДРК. Сума моментів ДРК та РМ утворюють результуючий момент  $M_{ДРК+РМ}$ , який передається на РП. Долаючи момент опору  $M_{оп}$ , відбувається поворот керованих коліс КК. Основний вплив на момент опору  $M_{оп}$

керованих коліс КК мають навантаження на керовану вісь тролейбуса  $G_{KB}$  (для більшості тролейбусів  $G_{KB} = 0,36 G_{T3}$  [2]), а також лінійна швидкість руху транспортного засобу  $v_{T3}$ .



**Рис. 1. Структурна схема системи рульового керування тролейбуса з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться:**

СК – системи керування електричним підсилювачем; ДРК – двигун з ротором, що котиться;  
 РП – рульовий привід; РМ – рульовий механізм; КК – керовані колеса

Запропонована у роботі система рульового керування складається з електричної частини представленої системою керування з силовим перетворювачем, електромеханічного перетворювача – ДРК, а також механічної частини – рульового приводу РП та рульового механізму РМ.

Основою імітаційної моделі є математична модель системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК. Математична модель складається з системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які характеризують електромеханічні перетворення ДРК, його механічну взаємодію з елементами РМ та РП, а також вплив моменту опору повороту керованих коліс [3-7].

Математична модель, яка характеризує електромеханічні перетворення ДРК складається з такої системи рівнянь [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_n = i_n R_n + \frac{di_n}{dt} \cdot L_{\partial n} + K_{En} \cdot \omega_p \\
 J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_e + M_{\text{сод}} - M_y \\
 J_k \frac{d^2 \Theta_k}{dt^2} = M_y - M_{on} - M_t \operatorname{sgn}\left(\frac{dy_s}{dt}\right) \\
 M_y = c_2 \arcsin\left(\left(\frac{l_s + y_s}{l_r}\right) - \Theta_e\right) \int (\omega_p - \omega_k) dt \\
 L_{\partial n} = L_{(i,\varphi)n} + i_n \cdot \frac{\partial L_{(i,\varphi)n}}{\partial i_n} \\
 K_{En} = \frac{\partial L_{(i,\varphi)n}}{\partial \varphi} \cdot i_n \\
 \sum F = -F_G \sin(\varphi) - F_R + \sum F_y \\
 M_e = \sum F \cdot R_{p.зобн.} \\
 F_R = \mu_k F_N \\
 F_N = F_Z + F_G \cos(\varphi) + \sum F_x \\
 F_Z = m_R \omega_S^2 e \\
 F_G = m_R g
 \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $u_n$  – напруга котушки статора, В;

- $i_n$  – струм котушки статора, А;  
 $\varphi$  – геометричний кут повороту, град;  
 $\sum F$  – результуюча сила одностороннього магнітного тяжіння, Н;  
 $J_p$  – приведений момент інерції ротора, кг·м<sup>2</sup>;  
 $\omega_c$  – синхронна швидкість обертання магнітного поля, рад/с;  
 $\omega_k$  – кутова швидкість повертання керованих коліс, рад/с;  
 $\omega_p$  – швидкість обертання вихідного валу ротора, рад/с;  
 $R_{p.зовн.}$  – зовнішній радіус ротора, м;  
 $F_R$  – сила тертя, Н;  
 $F_G$  – вага ротора, Н;  
 $F_N$  – сила нормальної реакції опорної поверхні, Н;  
 $e$  – ексцентриситет, м;  
 $F_Z$  – центробіжна сила, Н;  
 $M_e$  – електромагнітний момент на валу двигуна, Н·м;  
 $M_{on}$  – момент опору, Н·м;  
 $m_R$  – маса ротора, кг;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $\mu_k$  – коефіцієнт тертя;  
 $K_{En}$  – коефіцієнт протиЕРС;  
 $L_{\partial n}$  – диференційна індуктивність, Гн;  
 $J_k$  – момент інерції керованих коліс у горизонтальній площині, кг·м<sup>2</sup>;  
 $c_z$  – жорсткість приводу керуючих коліс, Н·м/рад;  
 $M_t$  – момент тертя у рульовому приводі, Н·м;  
 $l_s$  – довжина штоку, м;  
 $l_r$  – відстань від штоку до поворотного важеля колеса, м;  
 $\Theta_s$  – кут повороту керованого колеса, рад;  
 $y_s$  – переміщення штоку, м;  
 $M_{вод}$  – момент, який створює водій при обертанні рульового колеса, Н·м;  
 $M_y$  – момент пружних сил, Н·м;

Момент опору повороту шини на місці визначається такою системою рівнянь [7-12]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 M_{res} = c_{\omega} \Theta_{wh}, \quad \Theta_{wh} < 5^{\circ} \\
 M_{res} = M_{\mu max} - (M_{\mu max} - c_{\omega} \Theta_{wh}) \left( \frac{\Theta_B - \Theta_{wh}}{\Theta_B - \Theta_A} \right)^2, \quad 5^{\circ} < \Theta_{wh} < 13^{\circ} \\
 M_{res} = M_{\mu max}, \quad \Theta_{wh} > 13^{\circ} \\
 M_{\mu max} = \frac{G_{wh} \cdot \mu}{16ab} \left[ \begin{array}{l}
 (a+2y)(b+2l_0) \sqrt{(a+2y)^2 + (b+2l_0)^2} + \\
 (a-2y)(b+2l_0) \sqrt{(a-2y)^2 + (b+2l_0)^2} + \\
 (a+2y)(b-2l_0) \sqrt{(a+2y)^2 + (b-2l_0)^2} + \\
 (a-2y)(b-2l_0) \sqrt{(a-2y)^2 + (b-2l_0)^2}
 \end{array} \right], \\
 M_{res} = c_{\omega} \cdot \frac{(a_{\partial u} + 2 \cdot r_k \cdot tg \beta_u) \cdot \Theta_k}{2 \cdot V}, \quad V > 1 \text{ м/с} \\
 c_{\omega} = k G_{wh} \cdot 10^{-3} \\
 l_0 = l_z - r_{wh} \cdot tg(\alpha_k + \gamma_{k0}) \\
 y = r_{wh} \cdot tg \beta_k
 \end{array} \right. , \quad (2)$$

- де  $c_{\omega}$  – кутова жорсткість шини, Н·м/град;  
 $G_{wh}$  – навантаження на кероване колесо, Н;  
 $k$  – визначають у діапазоні 9...11 [9,12];

$M_{\mu max}$  – граничний за зчепленням момент опору повороту шини;  
 $\Theta_A$  – максимальний кут повороту колеса на лінійній ділянці,  $\Theta_A = 5^\circ$ ;  
 $\Theta_B$  – мінімальний кут повороту колеса на ділянці з граничним зчепленням,  $\Theta_B = 13^\circ$ ;  
 $\mu$  – коефіцієнт зчеплення шини з контактною поверхнею;  
 $a, b$  – сторони приведенного рівновеликого прямокутника контактної відбитку шини з контактною поверхнею, м;  
 $V$  – лінійна швидкість, м/с;  
 $y$  – плече стабілізації, м;  
 $l_o$  – плече обкатки, м;  
 $l_z$  – довжина цапфи, м;  
 $r_{wh}$  – радіус керуючого колеса, м;  
 $\alpha_k$  – кут поперечного нахилу шворня, рад;  
 $\gamma_{k0}$  – кут розвалу керуючого колеса, рад;  
 $\beta_k$  – кут повздовжнього нахилу шворня, рад.

Додатковий момент опору при повороті керованих коліс, виходячи з аналізу джерел [13-14], складається з моментів, які не мають суттєвого впливу на загальний момент опору або для їх визначення немає однозначних залежностей. На поверхнях з високим коефіцієнтом зчеплення момент опору повороту шини  $M_{\mu max}$  досягає до 90% від загального моменту опору [14]. Для спрощення розрахунку приймемо, що значення додаткового моменту опору визначається як:

$$M_{\text{дод}} = 0,15 \cdot M_{\mu max}. \quad (3)$$

Загальний момент опору повороту керованих коліс визначається:

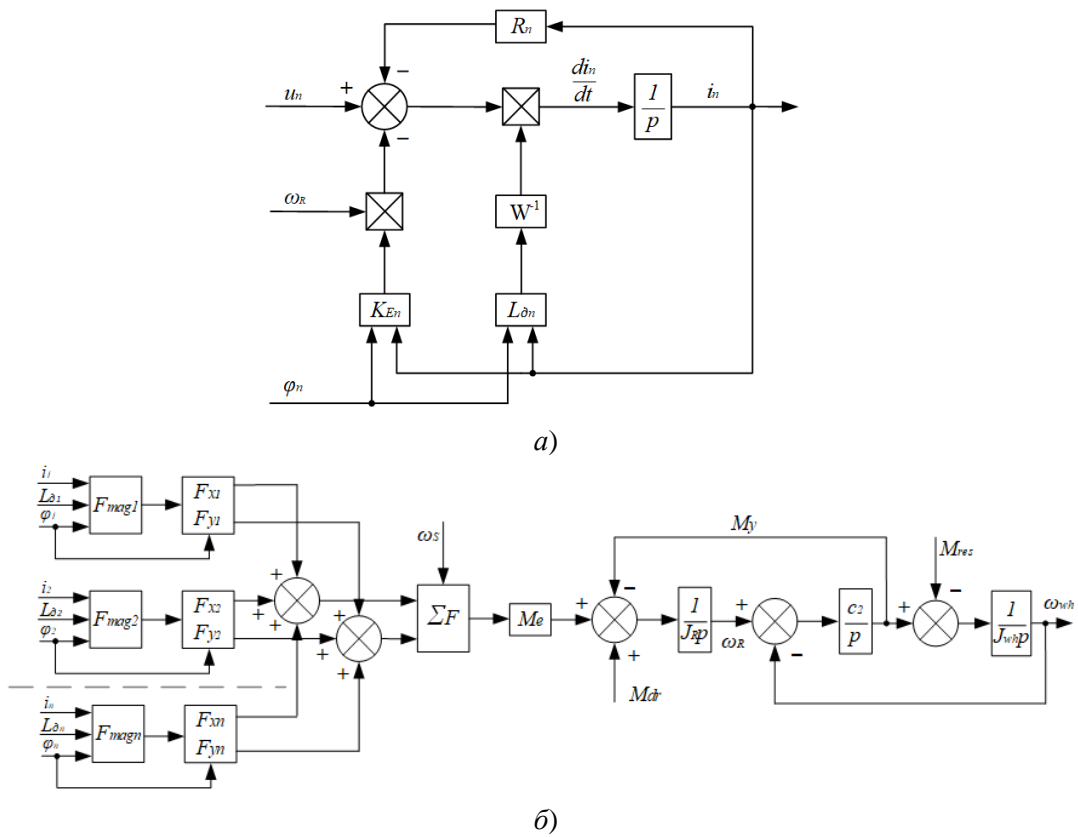
$$M_{\text{он}} = M_{\text{res}} + M_{\text{дод}}. \quad (4)$$

Імітаційна модель базується на функціональних схемах (див. рис. 2) відповідно до системи рівнянь математичної моделі (1) [7].

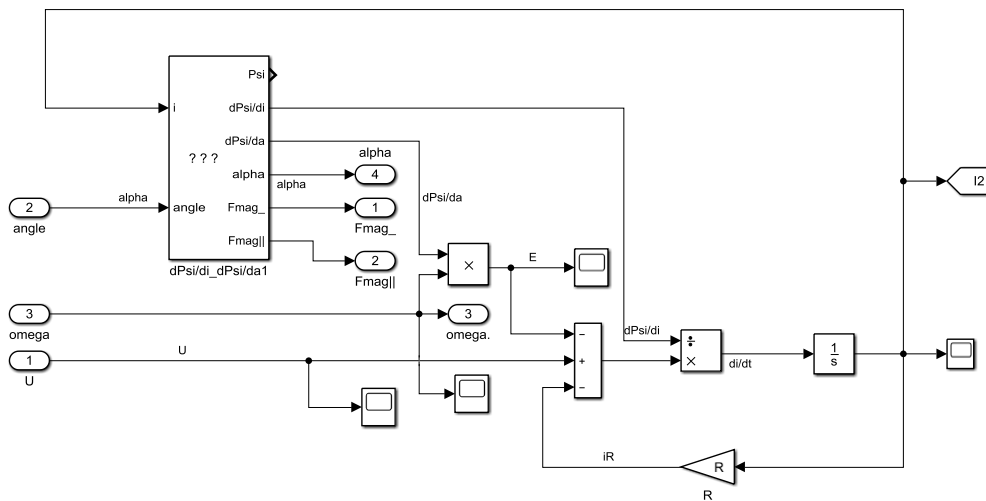
Спираючись на функціональну схему (рис. 2, а) створено Simulink-модель полюсу ДРК (рис. 3). Вхідними величинами даної моделі є керуючі імпульси напруги живлення системи керування, кутова швидкість обертання ротора ДРК, кут повороту мінімального повітряного зазору відносно полюсу. Важливим елементом моделі є блок розрахунку диференційних потокозчеплення, індуктивності та коефіцієнта проти ЕРС, а також визначення складових магнітної сили полюсу ДРК.

Розрахунок миттєвих значень диференційних потокозчеплення, індуктивності та коефіцієнта проти ЕРС, а також радіальної і тангенціальної складових магнітної сили полюсу ведеться на основі апроксимованих дискретних значень згаданих раніше величин отриманих попереднім моделюванням магнітного поля ДРК методом кінцевих елементів.

Такий підхід пояснюється особливостями конструкції ДРК. Двигун має складну магнітну систему. Магнітна індукція у зазорі двигуна залежить не лише від струму у котушці полюсу, а й від просторового положення ротора відносно статора. Тому для отримання моделі, характер процесів якої максимально наближений до реальних та враховує нелінійну поведінку магнітної системи двигуна необхідно використовувати запропонований підхід [15-18].



**Рис. 2. Функціональні схеми електричної та механічної підсистеми рульового керування тролейбуса на базі ДПК [7]:**  
 а – функціональна схема полюсу ДПК; б – функціональна схема механічної підсистеми рульового керування на базі ДПК



**Рис. 3. Simulink-модель полюса ДПК**

В рамках даної роботи за попередньо визначеними необхідними механічними параметрами підсилювача РП тролейбуса ЛАЗ Е183Д1 [19,20], спираючись на методи розрахунку [21-26] та особливості конструкції систем рульового керування визначено технічні та масогабаритні характеристики ДПК, які представлені у таблиці 1. Отримані дані дозволяють провести

комплексний розрахунок магнітної системи ДРК та визначити характеристики потокозчеплення, диференційної індуктивності, та радіальної і тангенціальної складових магнітної сили полюса.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики ДРК

| Параметр   | Величина   |
|--|------------|
| Номінальна напруга, В                              | 400        |
| Номінальний струм котушки, А                       | 6          |
| Номінальна частота обертання вихідного валу, об/хв | 4          |
| Момент на валу у номінальному режимі, Н·м          | 5400       |
| Число полюсів                                      | 20         |
| Внутрішній діаметр статора, мм                     | 700        |
| Зовнішній діаметр ротора, мм                       | 699,5      |
| Висота спинки статора, мм                          | 75         |
| Висота зубця статора, мм                           | 45         |
| Ширина зубця статора, мм                           | 100        |
| Внутрішній діаметр ротора, мм                      | 640        |
| Довжина осердя ротора, мм                          | 100        |
| Маса ротора, кг                                    | 38,8       |
| Ексцентриситет, мм                                 | 0,5        |
| Кількість витків котушки                           | 60         |
| Опір котушки, Ом                                   | 31         |
| Матеріал осердя                                    | Сталь 2013 |

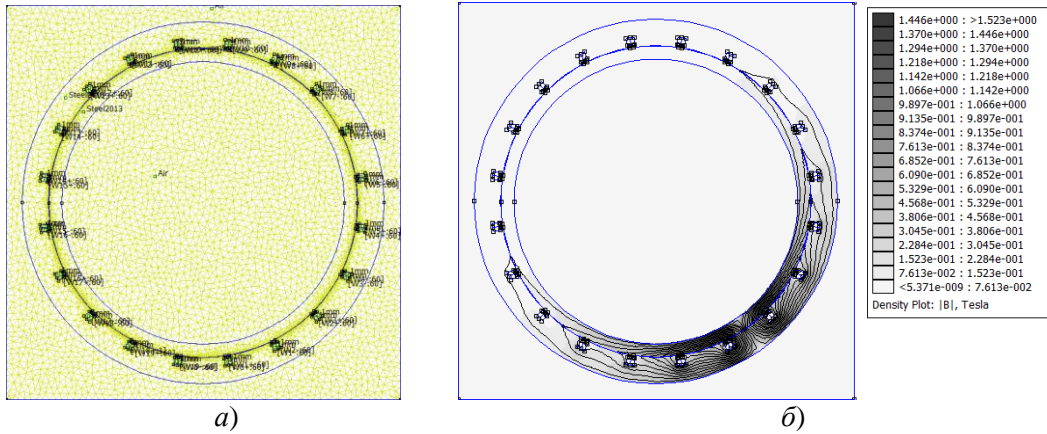
Розрахунок магнітних характеристик ДРК ведеться з використанням програмного комплексу FEMM. Під час розрахунку не враховується вплив гістерезису на поведінку магнітної системи та вплив вихрових струмів в осерді електричної машини. Розрахунок ведеться для проміжних положень точки мінімального магнітного зазору відносно полюса ДРК. На кожній ітерації з певним кроком змінюється струм котушки полюса. За допомогою мови Lua та можливостей постпроцесора FEMM на кожній ітерації визначається потокозчеплення та магнітний потік у магнітному зазорі, диференційна індуктивність, а також значення складових магнітної сили кожного полюса.

На рис. 4 зображено розрахункову область поперечного перетину ДРК у програмі FEMM.

За результатами розрахунку отримано набір дискретних значень параметрів ДРК, який не дає можливості їхнього використання для дослідження властивостей системи рульового керування. В такому випадку необхідно створення неперервної математичної моделі магнітних та механічних характеристик за допомогою регресійного аналізу. Для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати метод апроксимації кубічними сплайнами, який дозволяє привести розрахункові дані до вигляду аналітичної функції [4].

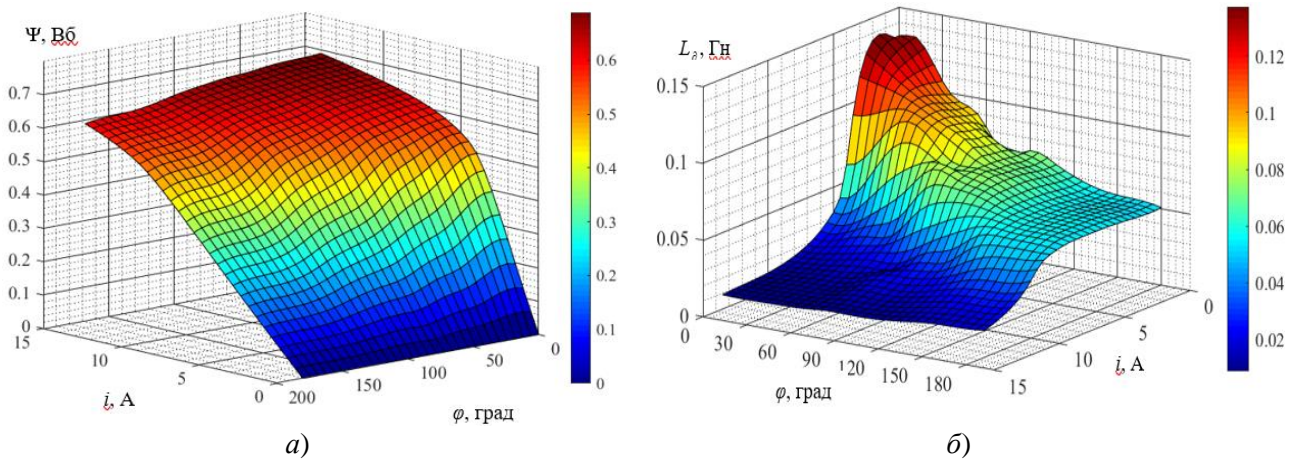
Порівняльний аналіз методів апроксимації [27] свідчить, що найкращою точністю наближення аналітичної функції мають методи, які базуються на апроксимації рядом Фур'є.

За результатами регресійного аналізу дискретних значень величин, отримані характеристики потокозчеплення  $\Psi$ , диференційної індуктивності  $L_\delta$ , а також радіальну  $F_x$  і тангенціальну  $F_y$  складові магнітної сили. Отримані характеристики зображено на рис. 5 та 6.



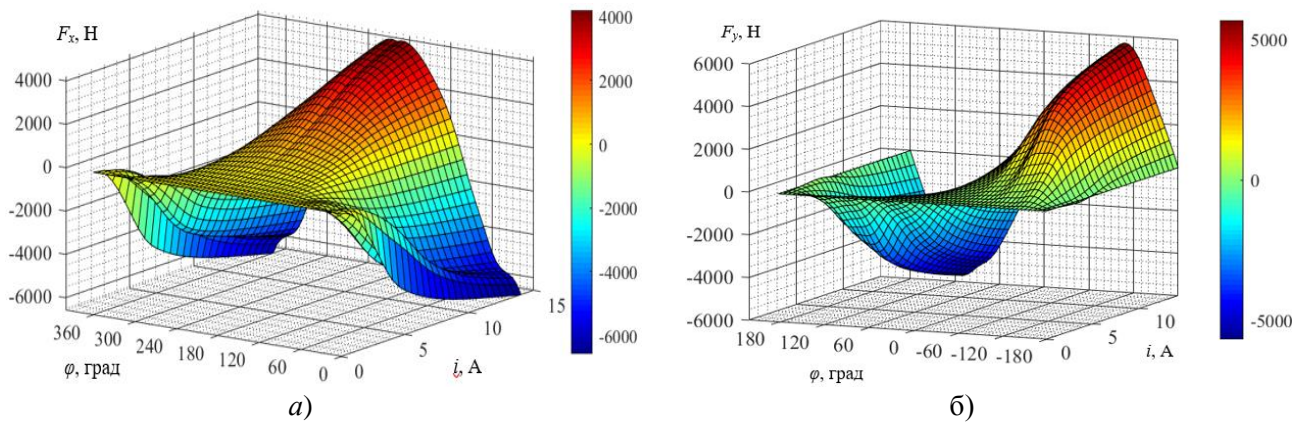
**Рис. 4. Розрахункову область поперечного перетину ДРК:**

*a* – розрахункову область ДРК у препроцесорі FEMM; *б* – картина розподілу магнітного поля у постпроцесорі FEMM для заданого положення та струму котушки полюса



**Рис. 5. Електромагнітні характеристики полюса ДРК:**

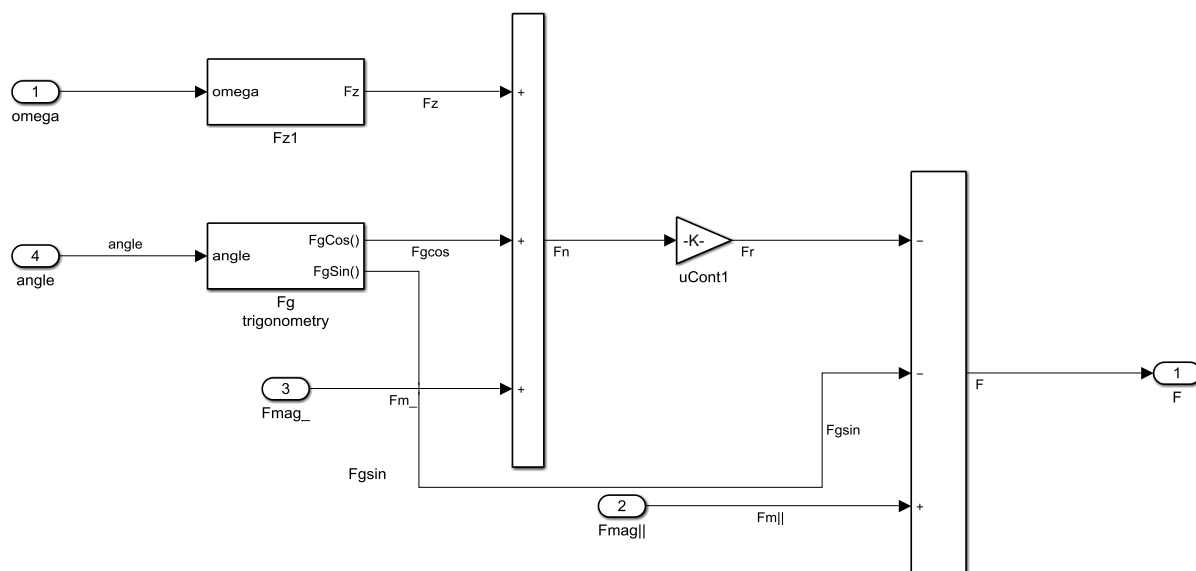
*a* – потокозчеплення котушки полюса статора ДРК; *б* – диференціальна індуктивність котушки полюса статора ДРК



**Рис. 6. Електромеханічні характеристики полюсу ДРК:**

*a* – радіальна сила полюса ДРК; *б* – тангенціальна сила полюса ДРК

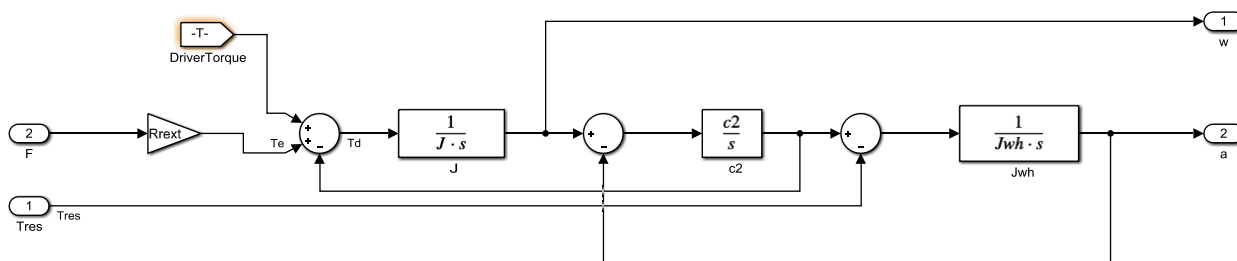
Визначені значення радіальної і тангенціальної складових магнітної сили для кожного полюса відповідно додаються один до одного. Результуючі значення складових магнітної сили передаються до блоку визначення сили одностороннього магнітного тяжіння (СОМТ) ДРК (див. рис. 7). Вхідними параметрами даного блоку також є кут повороту мінімального магнітного зазору відносно «початкового» положення та кутова швидкість обертання ротору.



**Рис. 7. Simulink-модель розрахунку СОМТ ДРК**

Визначення обертового моменту та частоти обертання вихідного валу ротора ДРК з урахуванням кута повороту керування коліс та пружних зв'язків відбувається у блоці зображеному на рис. 8. Створена Simulink-модель базується на функціональній схемі механічної частини системи рульового керування (див. рис. 2, б).

До вхідних значень блоку належать СОМТ, момент з РМ та загальний момент опору повороту керування коліс.

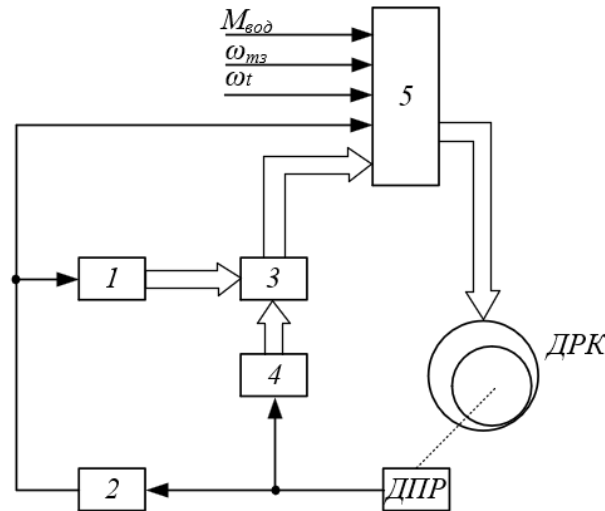


**Рис. 8. Simulink-модель визначення обертового моменту та кутової швидкості ДРК**

Регулювання вихідних характеристик підсилювача РП на базі ДРК забезпечується за рахунок системи керування струмами у котушках полюсів ДРК. Як показано на структурній схемі (див. рис. 9) система має канал керування за кутом положення ротора відносно розточки статора. Сигнал з датчика положення ротора (ДПР) надходить до блоку 2, для визначення синхронної частоти обертання ротора. Блок 1 розраховує кути увімкнення та вимкнення для кожної фази двигуна з ротором, що обертається (ДРК). Блок 3 проводить порівняння кутів увімкнення та вимкнення, які надходять з блоку 1 з розрахованими у блоці 4 кутами повороту ротора відносно кожної фази ДРК.

У блоці 5 відбувається формування комутаційних імпульсів для кожної фази ДРК, а також контроль синхронної частоти обертання ротора залежно від сигналу завдання.

Система керування враховує момент на рульовому колесі та швидкість руху тролейбуса. Це дозволяє динамічно підлаштовуватися під умови руху для забезпечення максимальної ефективності електроприводу та безпеки і комфорту під час руху тролейбуса.



**Рис. 9. Структурна схема системи керування електричним приводом у складі системи рульового керування троллейбуса:**

$\omega_t$  – сигнал завдання частоти обертання ротора;  $\omega_{mз}$  – швидкість транспортного засобу;  $M_{вод}$  – момент на рульовому колесі водія; ДРК – двигун з ротором, що котиться; ДПР – датчик положення ротора;

1 – блок визначення кутів увімкнення та вимкнення фаз; 3 – блок порівняння кута повороту ротора;

2 – блок визначення частоти обертання ротора; 4 – блок визначення кута повороту ротора для кожної фази статора; 5 – формувач імпульсів комутації для кожної фази статора

Спираючись на структурну схему (див. рис. 9) розроблена Simulink-модель системи керування (рис. 10). Вхідними параметрами моделі є частота обертання вихідного валу ДРК, частота обертання завдання та момент опору на рульовому колесі. Моменти подачі керуючих імпульсів на кожен котушку ДРК регулюються блоками кута вимкнення полюсу *off angle* та кута увімкнення полюсу *on angle*.

Модель (рис. 10) складається з підсистем контролю моменту на рульовому колесі (див. рис. 11, а), частоти обертання вихідного валу (див. рис. 11, б) та датчика положення ротора (ДПР) (див. рис. 11, в). Кут мінімального магнітного зазору відносно кожного полюсу ДРК розраховується у блоці КTs (див. рис. 11, в). Після чого у блоці mod приводяться до діапазону  $0...360^\circ$ .

Підсистема контролю частоти обертання (див. рис. 11, б) порівнює значення миттєвої та заданої частоти обертання вихідного валу ДРК та за допомогою ПІД-регулятора генерує керуючий імпульс у вигляді логічної одиниці або нуля. Підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі (див. рис. 11, а) працює за схожим принципом.

Сигнали з усіх підсистем перемножуються між собою для формування результуючого керуючого впливу на котушки статора ДРК.

Для визначення миттєвих значень моменту опору повороту керованих коліс створено Simulink-модель зображену на рисунку 12. Вхідними параметрами моделі є лінійна швидкість руху тролейбуса та кут повороту керованих коліс. Модель базується на рівняннях (2) – (4)

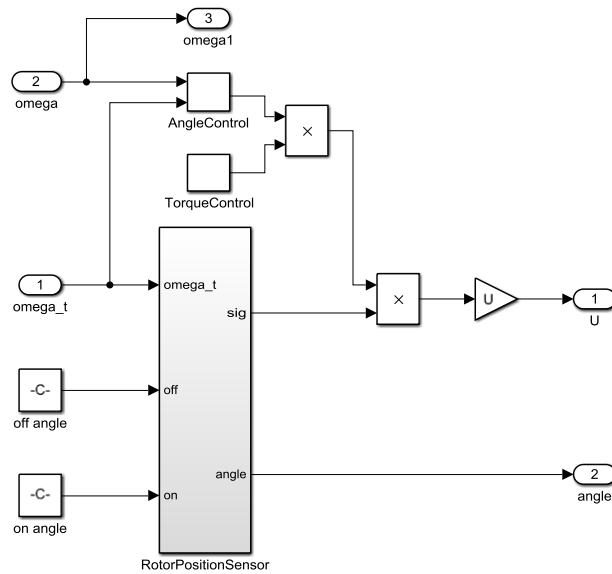


Рис. 10. Simulink-модель системи керування підсилювачем РП на базі ДПК

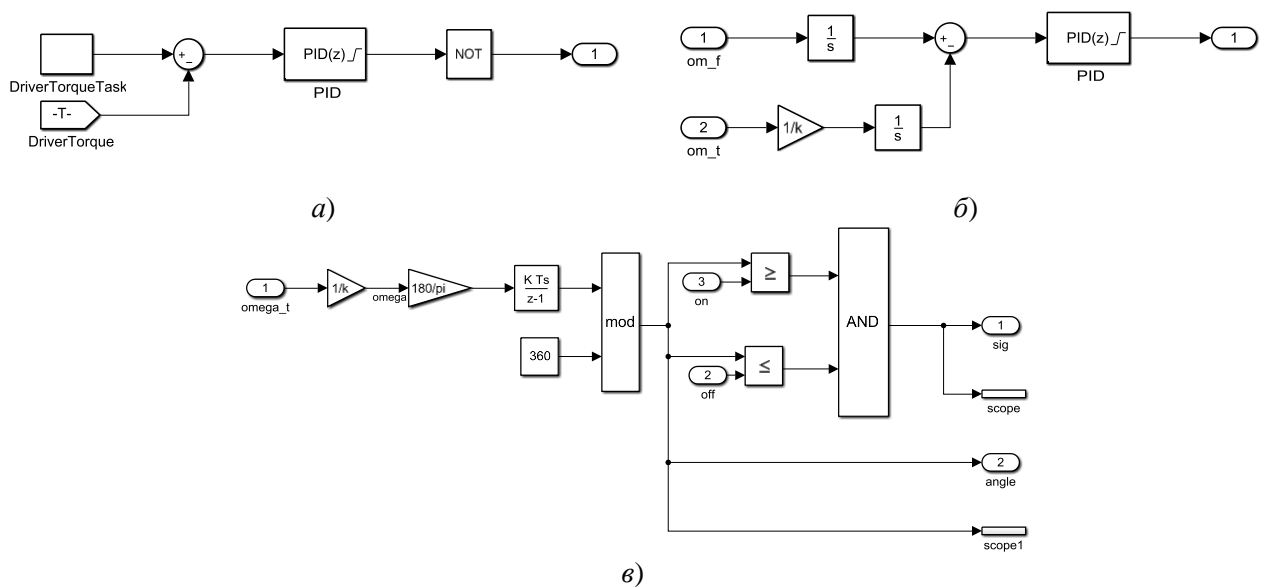
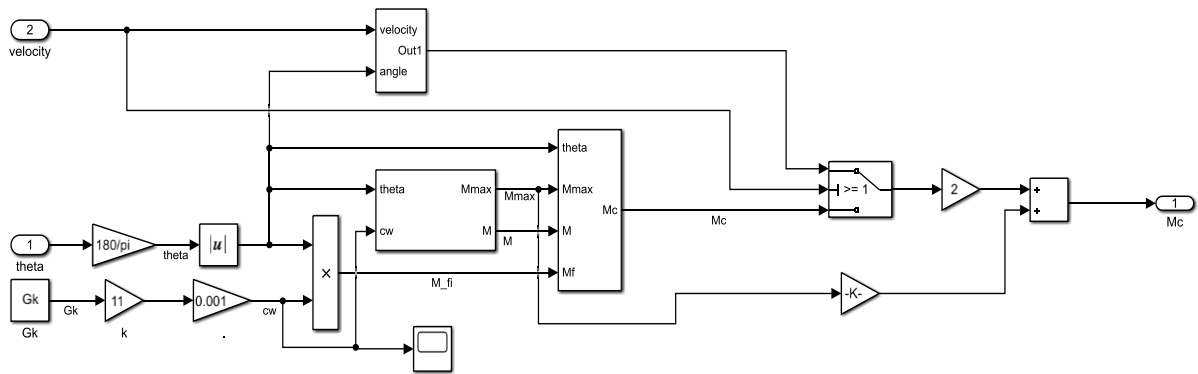


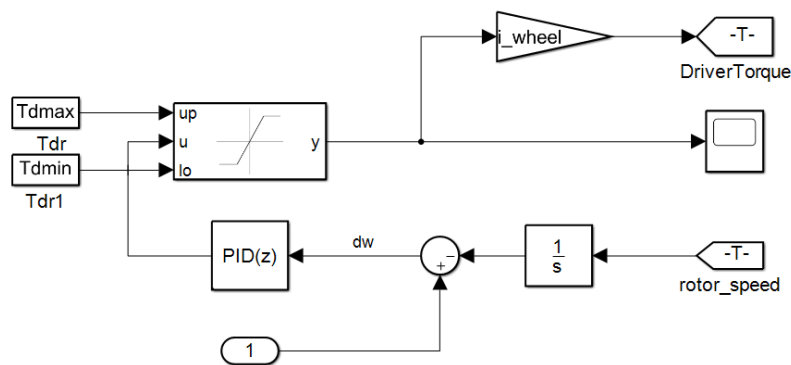
Рис. 11. Складові системи керування підсилювачем РП на базі ДПК:

*a* – підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі; *б* – підсистема контролю частоти обертання; *в* – підсистема ДПР.



**Рис. 12. Simulink-модель визначення моменту опору повороту керованих коліс**

Одним з основних завдань системи рульового керування з підсилювачем РП є підтримання оптимального моменту опору на рульовому колесі. Значення такого моменту регламентуються відповідними нормативними актами [28]. Для імітації впливу водія на поворот керованих коліс та визначення моменту опору на рульовому колесі створена Simulink-модель зображена на рис. 13. Вхідними величинами блоку є кут повороту керованих коліс та кут повороту завдання. За отриманою похибкою регулювання ПІД-регулятор створює керуючий вплив на вході елементу динамічного насичення, який призначений для обмеження максимального та мінімального моментів, що створює водій тролейбуса. Отриманий крутний момент помножений на передаточне відношення РМ визначає керуючий вплив водія на поворот керованих коліс.



**Рис. 13. Simulink-модель визначення крутного моменту водія**

Загальна імітаційна модель системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК подана на рис. 14.

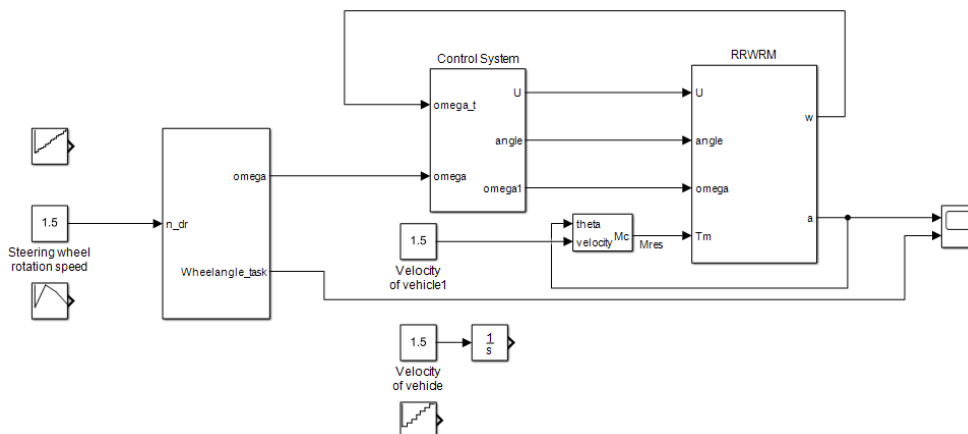


Рис. 14. Загальна імітаційна модель системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК

### Моделювання роботи системи рульового керування тролейбуса

Отримана імітаційна модель рульового керування (рис. 14) дозволяє виконувати цифрові дослідження підсилювачів РП на базі ДРК при різних режимах роботи та умовах експлуатації рульового керування тролейбуса.

У процесі моделювання прийняті такі припущення: магнітні системи кожної фази ДРК ідентичні, вихрові струми та гістерезис магнітопроводу ДРК не враховується, активні опори котушок полюсів ДРК рівні, взаємний вплив індукцій полюсів при одночасному узгодженому включенні котушок статора не враховується, величини коефіцієнтів жорсткості елементів механічної частини вважаються постійними, радіальне навантаження та тиск у шинах незмінні, взаємна кінематика тяг та шарнірів рульового керування та підвіски тролейбуса не впливає на перерозподіл сил, напруга живлення електричного двигуна не змінюється з часом.

На рис. 15 – 19 приведені часові діаграми результатів моделювання системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК при повороті рульового колеса на місці. При цьому навантаження на керовану вісь приймається максимально допустимим для тролейбуса ЛАЗ Е183Д1. Частота обертання рульового колеса не змінюється та має значення  $n_{вод}=1,5$  об/с. Напруга живлення електричного двигуна  $U_{жс} = 400$  В DC. Поворот керованих коліс на місці характеризується створенням максимального навантаження на елементи системи рульового керування.

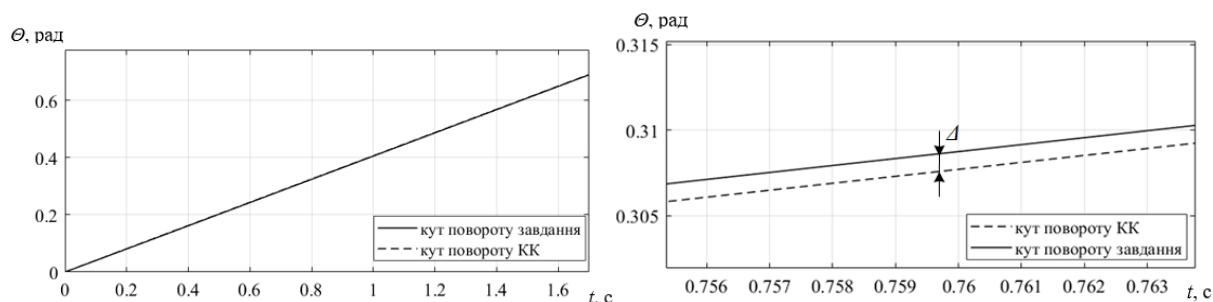
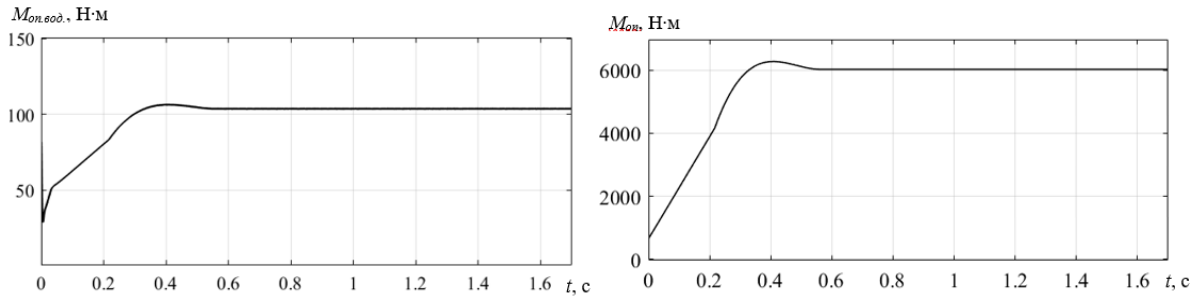
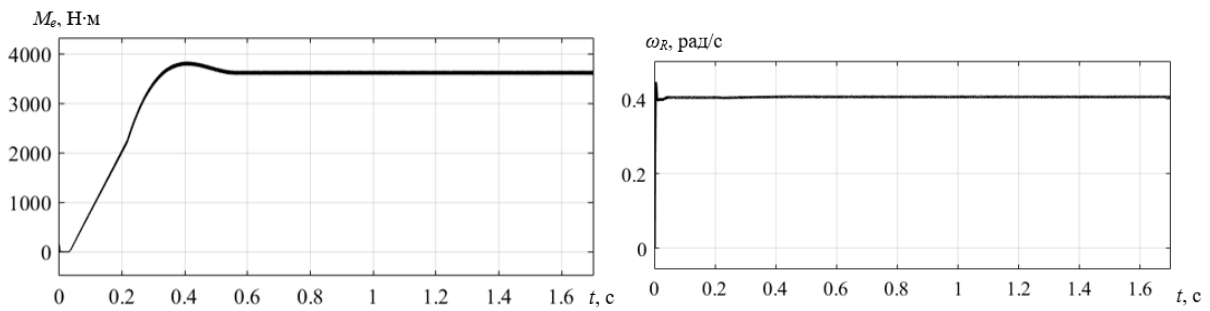


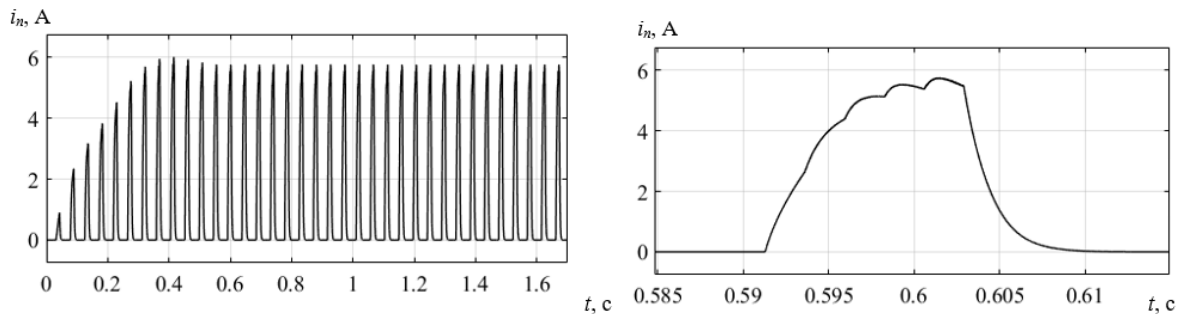
Рис. 15. Часові діаграми кута повороту керованих коліс



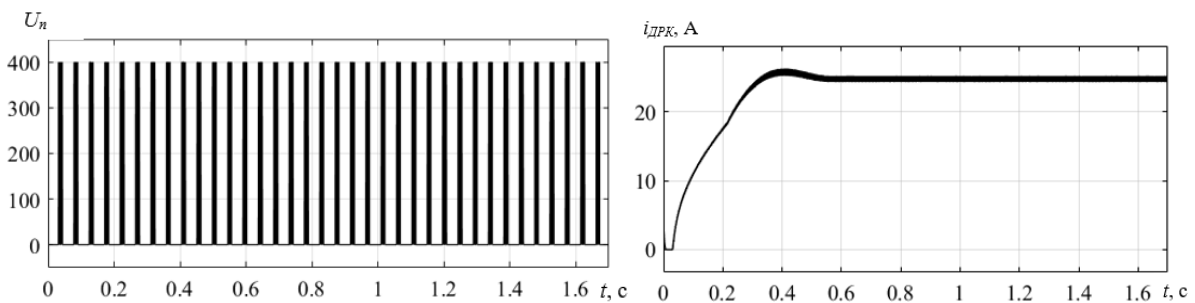
**Рис. 16.** Часові діаграми моменту опору на рульовому колесі та моменту опору повороту керованих коліс



**Рис. 17.** Часові діаграми електромагнітного моменту ДРК та частоти обертання вихідного валу ротора ДРК



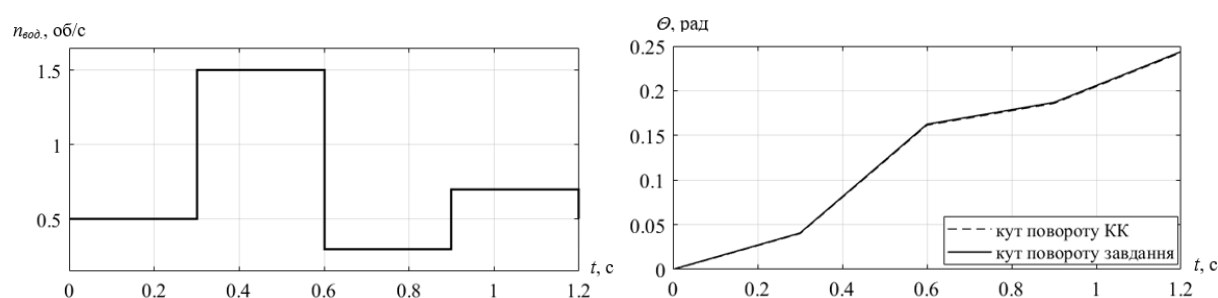
**Рис. 18.** Часові діаграми струму у котушці полюса ДРК



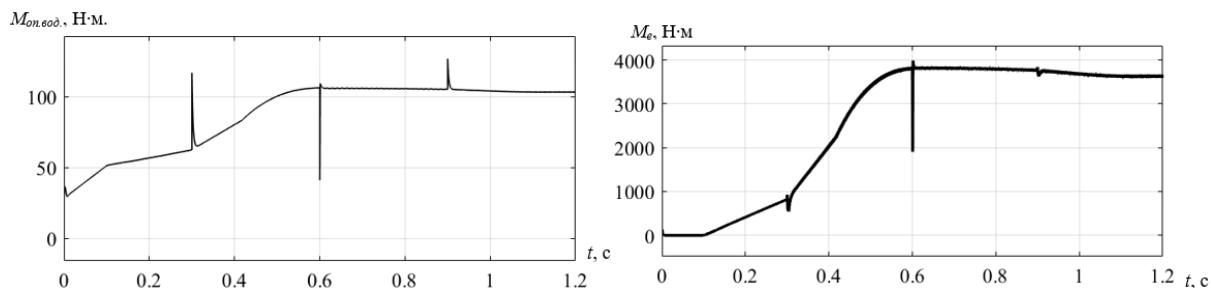
**Рис. 19.** Часові діаграми напруги прикладеної до котушки полюса ДРК та загальний споживаний струм ДРК

За отриманими результатами моделювання електропідсилювача РП на базі ДРК визначено, що при повороті керованих коліс на місці за заданих початкових умов абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує  $\Delta = 0,012$  рад. При цьому момент опору на рульовому колесі за заданим законом регулювання [29] відповідає рекомендованим значенням [28] та не перевищує  $M_{оп.вод} = 110$  Н·м. Момент опору повороту керованих коліс при цьому складає понад  $M_{оп} = 6000$  Н·м. Максимальний споживаний струм при повороті керованих з максимальним моментом опору складає  $i_{ДРК} = 24,76$  А. Споживання електричної потужності з мережі при цьому не перевищує  $P_{max} = 3,8$  кВт.

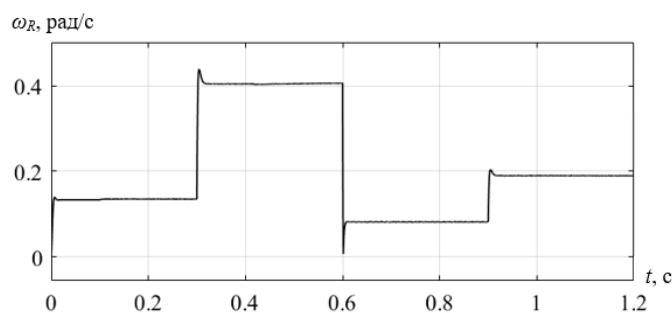
Однією з найважливіших властивостей системи рульового керування, яка впливає на безпеку руху, є стійкість до динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса. У роботі було проведено моделювання системи рульового керування тролейбуса при повороті керованих за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса. При цьому навантаження на керовану вісь приймається максимально-допустимим для тролейбуса ЛАЗ Е183D1. Напруга живлення електричного двигуна  $U_{жс} = 400$  В DC. Зміна швидкості обертання рульового колеса проходить кожні 0,3 с за характеристикою на рис. 20.



**Рис. 20. Часові діаграми зміни швидкості обертання рульового колеса та кута повороту керованих коліс тролейбуса**



**Рис. 21. Часові діаграми моменту опору на рульовому колесі та електромагнітного моменту ДРК за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса**



**Рис. 22. Часова діаграма частоти обертання вихідного валу ротора ДРК за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса**

За результатами моделювання визначено, що за заданих умов абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує  $\Delta = 0,015$  рад. При цьому час перехідного процесу зміни швидкості обертання вихідного валу ротора ДРК у моменти динамічної зміни частоти обертання рульового колеса складає  $t_{пер.пр.} = 0,011$  с. Це характеризує високі динамічні властивості системи рульового керування троллейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК. При цьому максимальна споживана потужність з електричної мережі залишається без змін.

**Висновки.** У роботі проведено дослідження системи рульового керування троллейбуса ЛАЗ Е183D1 з підсилювачем РП на базі ДРК. На основі математичної моделі системи рульового керування та розроблених функціональних схем створено імітаційну модель рульового керування троллейбуса з використанням пакету Matlab Simulink. Особливістю імітаційної моделі є врахування масогабаритних характеристик рухомого складу, параметрів підвіски керованих коліс, швидкості руху, врахування зміни параметрів магнітної системи ДРК під час роботи. Для врахування нелінійної поведінки магнітної системи та отримання моделі, характер процесів якої максимально наближений до реальних умов, електромеханічні і електромагнітні зв'язки визначені серією розрахунків польових задач методом кінцевих елементів. Отримані залежності апроксимовано усіченим рядом Фур'є, коефіцієнти гармонік якого інтерпольовані кубічними сплайнами.

За результатами імітаційного моделювання при максимально допустимому навантаженні на керовану вісь визначено, що абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує  $\Delta = 0,015$  рад. Час перехідного процесу при динамічній зміні умов повороту керованих коліс складає  $t_{пер.пр.} = 0,011$  с. Максимальний момент опору на рульовому колесі не перевищує значення  $M_{он.вод} = 110$  Н·м. При цьому максимальна споживана потужність підсилювача не перевищує  $P_{max} = 3,8$  кВт.

Створена імітаційна модель дозволяє проводити моделювання динамічних процесів у рульовому керуванні, враховуючи низку факторів, які впливають на поведінку системи та досліджувати системи рульового керування інших безколієних транспортних засобів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко Т. П., Скуріхін В. І., Колотило В. І., Агарков І.В. Аналіз проблем системи рульового керування троллейбусів та перспективи їх вирішення. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*, 2018. Т. 1, № 32. С. 115–125.
2. Далека В. Х., Хворост М. В., Скуріхін В. І., Скуріхін Д. І., Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина. навч. пос. Харків : ХНАМГ ім. О. М. Бекет., 2018. 370 с.
3. Franke M. Multidisziplinäre Modellierung und Simulation eines Rolling Rotor Switched Reluktanz Antriebes : Doktoringenieur. Magdeburg, 2012. 152 p.
4. Любарский Б. Г., Рябов Е. С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде Matlab Simulink. *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*. 2011. С. 404–424.р
5. Franke M., Brutscheck M., Schmucker U. Modeling and simulation of a rolling rotor switched reluctance motor. 2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Brno, 13–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5207002>.
6. Miller T. J. E. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, no. 1. P. 83–90.
7. Pavlenko T., Petrenko O., Shavkun V., Aharkov I. Development of a mathematical model of the trolleybus steering system using a rolling rotor switched reluctance motor. *«EUREKA: Physics and Engineering»*. 2021. № 4. P. 63–75.
8. Рымша В.В., Радимов И.Н., Гульий М.В., Кравченко П.А., Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 5. С. 24–26.
9. Клімов Е. С. Щодо визначення моменту опору повороту шини керованого колеса на місці. *Міжвузівський збірник "Наукові Нотатки"*. 2014. № 46. С. 246–251.
10. Солтус А.П., Пилипенко В.І., Вплив плеча обкатки на граничний за зчепленням момент повороту шини. *Вісник КДПУ*. 2008. № 1 (48), ч.1. С. 71–74.
11. Солтус А. П., Клімов Е. С. Дослідження особливостей кінематики відбитка шини керованого колеса при повороті на місці з розблокованим приводом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2011. № 1. С. 75–79.
12. Клімов Е. С. Щодо питання визначеності вагового стабілізуючого моменту. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2009. Т. 1. № 1(54). С. 61–65.

13. Ященко Д. М. До визначення моментів, що діють на керуючий колісний модуль автомобіля. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2011. № 8. С. 229–234.
14. Солтус А. П. Основы теории рабочего процесса и расчета колесных управляющих модулей: монография. 7-ме вид. Деп. в Укр. НИИНТИ №501-Ук90 ВИНТИ «Деп. науч. Труды», 1990. 234 с.
15. Мілих В. І., Ревуженко С. А. Теорія і практика чисельно-польового визначення електромагнітних характеристик турбогенераторів при їх роботі в енергосистемі. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2019. № 4. С. 3–15.
16. A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors / H.-P. Chi et al. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 1071–1080.
17. Milykh V. I., Shilkova L. V. Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 5. P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
18. Milykh V. I., Tymin M. G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical engineering & electromechanics*. 2021. No. 4. P. 12–18.
19. Агарков І. В. Визначення механічних параметрів електричного підсилювача керма у системі рульового керування троллейбусу. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*. 2018. № 35. С. 52–59.
20. Тролейбус Е183Д1-01. Керівництво з експлуатації. Львів, 2006. 277 с.
21. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика расчета вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Электротехника і Електромеханіка*. 2009. № 4. С. 24–29.
22. Егоров А.В., Наний В. В., Юхимчук, В. Д., Потоцкий, Д.В. Выбор оптимального материала для сердечника двигателя с катящимся ротором, с применением численных методов/ *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2011. № 60. С. 59–62.
23. Дунев А.А., Масленников А. М., Наний В. В., Петренко Н.Я., Сравнение конструкций двигателей с катящимся ротором // *II Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, м. Харків: НТУ «ХПІ», 25–27 берез. 2008 р, С. 57–58.
24. Наний В.В., Мирошниченко А.Г., Юхимчук В. Д., Дунев А.А., Влияние конструкции вентильного ДКР на параметры его магнитного поля. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2007. № 25. С. 62–65.
25. Euyhab El-Kharashi. Design and Analysis of Rolled Rotor Switched Reluctance Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2006. Vol. 1, no. 4. P. 472–481. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2006.1.4.472>.
26. Analysis of a rolling rotor switched reluctance motor with power electronic / M. Franke et al. *17th Telecommunications forum TELFOR 2009*, Belgrade, 24–26 November 2009.
27. Грищенко Н.В., Семериков С.А., Хараджян А.А., Чернов Е.В. Порівняльний аналіз методів апроксимації. *Кривий Ріг : КДПІ*, 1998. 25 с.
28. ДСТУ UN/ECE R 79-01-2002. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів стосовно механізмів рульового управління (Правила ЕЖ ООН № 79-01:1991, IDT ). Вид. офіц.
29. Скуріхін І. Л., Коваленко А. В. Механічне обладнання рухомого складу міського електротранспорту: навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2012. 226 с.
30. Chengyuan He, Thomas Wu. Permanent Magnet Brushless DC Motor and Mechanical Structure Design for the Electric Impact Wrench System. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/en11061360>.
31. Łuczak D. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection. *19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* : IEEE, Miedzyzdroje, 2–5 September 2014. November 2014.
32. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Электротехника і електромеханіка*. 2009. № 1. С. 13–16.
33. Любарский Б. Г., Парфенюк Т. В., Ерицян Б. Х. Аппроксимация зависимостей электромагнитных параметров тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. Т. 6, № 4(42). С. 51–54.

## REFERENCES

1. Pavlenko T.P., Skurikhin V.I., Kolotilo V.I., Aharkov I.V., (2018) *Analiz problem systemy rulovoho keruvannia troleibusiv ta perspektyvy yikh vyrishennia* [Analysis of problems of the trolleybuses steering system and perspectives for their solution], Collection of scientific works of DUIT. Series «Transport Systems and Technologies», 2018, issue 32. part.1, p. 115-123. [in Ukrainian]
2. Daleka V.H., Hvorost M.V., Skurihin V.I., Skurihin D.I. (2018). *Ruhomiy sklad mIskogo elektrichnogo transportu. Mehanichna chastina* [Rolling stock of urban electric vehicles. Mechanical part] Tutorial, Kharkiv, NUUE in Kharkiv. [in Ukrainian]
3. Franke M. (2012) *Multidisziplinäre Modellierung und Simulation eines Rolling Rotor Switched Reluktanz Antriebes*: Doktoringenieur. Magdeburg, 152 p.
4. Lyubarskiy B. G., Ryabov E. S. (2011) *Modelirovanie elektroprivodov na osnove reaktivnykh induktornykh dvigateley v srede Matlab Simulink* [Modeling of electric drives based on reluctance inductor motors using Matlab Simulink]. NTU «KHPI». 404–424. [in Russian]

5. Franke M., Brutscheck M., Schmucker U. (2009) *Modeling and simulation of a rolling rotor switched reluctance motor*. 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Brno, 13–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5207002>.
6. Miller T. J. E. (2002) *Optimal Design of Switched Reluctance Motors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 49, no. 1. P. 83–90.
7. Pavlenko T., Petrenko O., Shavkun V., Aharkov I. (2021) *Development of a mathematical model of the trolleybus steering system using a rolling rotor switched reluctance motor*. «EUREKA: Physics and Engineering». № 4. p. 63–75.
8. Ryimsha, V.V., Radimov, I.N., Gulyiy, M.V., Kravchenko, P.A. (2010) *Usovershenstvovannaya tseпно-polevaya model ventilno-reaktivnogo dvigatelya* [Improved chain-field model of the valve-reluctance engine]. Elektrotehnika I Elektromekhanika. № 5. 24–26 p. [in Russian]
9. Klimov E.S., (2014) *Shhodo vyznachennya momentu oporu povorotu shyny kerovanogo koleasa na misci*. [Regarding determining the moment of resistance of the steering wheel tire in place.], Intercollegiate collection 'SCIENTIFIC NOTES'. Lutsk, Issue №46, p.246-251.
10. Soltus. A. P., Pylypenko V.I., (2008) *Vplyv plecha obkatky na hranychnyi za zcheplyenniam moment povorotu shyny* [Influence of the running arm on the ultimate grip moment of tire rotation], Bulletin of KNPI issue 48, part 1, pp.71-74.
11. Soltus. A. P., Klimov E.S., (2011) *Doslidzhennia osoblyvosti kinematyky vidbytky shyny kerovanoho koleasa pry povoroti na misti z rozblokovanyim pryvodom* [Investigation of Kinematics Features of the Steering Wheel Tire Imprint when Turning in Place with the Unlocked Drive] Mikhail Ostrogradsky Kremenchuk National University, №1, part 1, p 75-79.
12. Klimov E.S., (2009) *Shhodo pytannia vyznachennosti vahovoho stabilizuiuchoho momentu* [Concerning the certainty of weight stabilizing moment], Mikhail Ostrogradsky Kremenchuk National University. Issue 1(54), part 1, p. 61-65
13. Iashchenko D. M. *Do vyznachennia momentiv, shcho diut na keruivchyi modul avtomobilia*. Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia. 2011. № 8. 229–234.
14. Soltus. A. P., (1990) *Osnovy teorii rabochego prozessa i rascheta kolesny`kh upravlyayushhikh modulej: monografiya* [Fundamentals of the theory of the working process and the calculation of wheel control modules: a monograph], Scientific works, 234 p.
15. Milykh V. I., Revuzhenko S. A. (2019) *Teoriia i praktyka chyselno-polovoho vyznachennia elektromahnitnykh kharakterystyk turbogeneratoriv pry yikh roboti v enerhosystemi* [Theory and practice of numerical-field determination of electromagnetic characteristics of turbogenerators during their operation in the power system.]. Visnyk NTU «KhPI». Seria: Elektrichni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii. № 4. P. 3–15.
16. A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors / H.-P. Chi et al. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 1071–1080.
17. Milykh V. I., Shilkova L. V. (2020) *Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation*. Electrical Engineering & Electromechanics. No. 5. P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
18. Milykh V. I., Tymin M. G. (2021) *A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings*. Electrical engineering & electromechanics. No. 4. P. 12–18.
19. Aharkov I. V. (2018) *Vyznachennia mekhanichnykh parametriv elektrichnoho pidsylivacha kerma u systemi rulovoho keruvannia troleibusu* [Determination of mechanical parameters of the electric power steering in the trolleybus steering system.]. Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seria : «Transportni systemy i tekhnolohii», № 35. P. 52–59.
20. Trolejbus E183D1-01. Kerivny`chtvo z ekspluatatsiyi, (2006) [Trolleybus E183D1-01. Operation manual], Lviv, 277 p.
21. Zinchenko E. E., Finkelshteyn V. B. (2009) *Metodika rascheta ventilnykh induktorno-reaktivnykh dvigatelyu*. [Method for calculating the valve inductor-reluctance motors] Elektrotehnika I Elektromekhanika. № 4. P. 24–29.
22. Ehorov A. V., Nanyi V. V., Yukhymchuk V. D., Pototskyi D. V., (2011) *Vyibor optimalnogo materiala dlya serdechnika dvigatelya s katyashchimsya rotorom, s primeneniem chislennykh metodov* [Selection of the optimal material for the core of a rolling rotor motor, using numerical methods] Visnik NTU «HPI». № 60. P. 59–62.
23. Dunev A. A., Maslennykov A. M., Nanyi V.V., Petrenko N. Ya. (2008) *Sravnienie konstruksiy dvigatelyu s katyashchimsya rotorom*. [Comparison of designs of a rolling rotor switched reluctance motor] II UnIversitetska naukovopraktychna studentska konferentsiya magistrantiv NTU «HPI», m. Kharkiv: NTU «HPI», 25–27 berez. 2008 r, P. 57–58.
24. Nanyi V. V., Myroshnychenko A. H., Yukhymchuk V. D., Dunev A. A. (2007) *Vliyanie konstruksii ventilnogo DKR na parametry ego magnitnogo polya*. [Influence of the design of the valve RRSRM on the parameters of its magnetic field] Visnik NTU «HPI». № 25. P. 62–65.
25. Eyhab El-Kharashi. Design and Analysis of Rolled Rotor Switched Reluctance Motor. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2006. Vol. 1, no. 4. P. 472–481. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2006.1.4.472>.
26. M. Franke, M. Brutscheck, H. Mrech and U. Schmucker (2009) *Analysis of a rolling rotor switched reluctance motor with power electronic*. 17th Telecommunications forum TELFOR 2009, Belgrade, 24–26 November 2009.
27. Hryshchenko N.V., Semerikov S.O., Chernov Ye.V., Kharadzhan O.A. (1998) *Porivnialnyi analiz metodiv aproksymatsii*. [Comparative analysis of approximation methods] Kryvyi Rih : KDPI, P. 25.
28. DSTU UN/ECE R 79-01-2002. *Yedyni tekhnichni prypysy shhodo ofitsiinoho zatverdzhennia dorozhnykh transportnykh zasobiv stosovno mekhanizmiv rulovoho upravlinnia* [Uniform technical prescriptions concerning the approval of road vehicles with regard to steering mechanisms] (Pravyla EЭК OON № 79-01:1991, IDT ). Vyd. ofits.
29. Skurihin I.L., Kovalenko A.V. (2012). *Mekhanichne obladnannya ruhomogo skladu miskogo elektrotransportu* [Mechanical equipment of rolling stock of city electric transport], Tutorial, Kharkiv: KNAME.

30. Chengyuan He, Thomas Wu. (2018) *Permanent Magnet Brushless DC Motor and Mechanical Structure Design for the Electric Impact Wrench System*. *Energies*. Vol. 11, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/en11061360>.

31. Luczak D. (2014) *Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection*. 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) : IEEE, Miedzyzdroje, 2–5 September 2014. November 2014.

32. Zinchenko E. E., Finkelshteyn V. B. (2009) *Metodika aproksimatsii kriviyh namagnichivaniya ventilyh inductorno-reaktyvnyh dvigateley*. [A technique for approximating the magnetization curves of inductor-reluctance motors] *Elektrotehnika I elektromehanika*. № 1. P. 13–16.

33. Lyubarskiy B. G., Parfenyuk T. V., Eritsyay B. H. (2011) *Aproksimatsiya zavisimostey elektromagnitnyh parametrov tyagovogo sinhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannyh magnitov* [Approximation of the dependences of the electromagnetic parameters of a traction synchronous motor with permanent magnet excitation]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyh tekhnologiy*. № 4(42). P. 51–54.

**Aharkov Ivan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> PhD degree student, Department of Electrical Transport, National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova st., 17 Kharkiv, 61002, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-8766>

## **SIMULATION OF TROLLEBUS STEERING SYSTEM WITH ELECTRIC POWER STEERING BASED ON ROLLING ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**

*The analysis of power steering which used on modern rolling stock is carried out. Their main shortcomings are identified. Given the requirements for the steering of trolleybuses, a solution to increase its efficiency is proposed.*

*Based on the developed mathematical model and functional diagrams of the trolleybus steering system with a electric power steering based on rolling rotor switched reluctance motor, a simulation model of trolleybus steering was created using the Matlab Simulink package. The peculiarity of the simulation model is taking into account the mass and size characteristics of the rolling stock, the parameters of the suspension of the steered axle, the impact of the road surface and the speed of the trolleybus, changes in the parameters of the electric motor magnetic system during operation. The rolling rotor switched reluctance motor which is offered for use as the electric power steering of the LAZ E183D1 trolleybus is calculated.*

*The calculation of the magnetic system of the engine by the finite element method with the subsequent approximation of the obtained results is carried out. With the help of the developed simulation model the simulation of the trolleybus steering system with electric power steering based on rolling rotor switched reluctance motor was performed. Time diagrams of transients in the trolleybus steering system are obtained and their processing and analysis are carried out.*

**Keywords:** *steering, electric power steering, simulation modeling, trolleybus, rolling rotor switched reluctance motor, magnetomotive force.*