

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**АГАРКОВ ІВАН ВАЛЕНТИНОВИЧ**

УДК 629.3.027.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ  
ТРОЛЕЙБУСА ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ДВИГУНА З РОТОРОМ  
ЩО КОТИТЬСЯ**

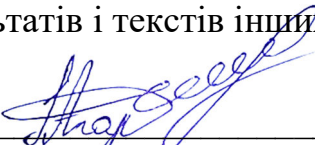
Спеціальність 275 – Транспортні технології (за видами)

Освітньо-наукова програма – Транспортні технології. Електротранспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

І. В. Агарков

Науковий керівник  
Павленко Тетяна Павлівна,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2022

## АНОТАЦІЯ

*Агарков І. В.* Удосконалення системи рульового керування тролейбуса шляхом використання двигуна з ротором що котиться. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології (за видами), освітньо-наукова програма – Транспортні технології. Електротранспорт – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, 2022.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичного завдання, що полягає в дослідженні та удосконаленні системи рульового керування тролейбусу за рахунок використання двигуна з ротором що котиться, обґрунтуванню теоретичних положень, розробці методичних підходів і науково-практичних рекомендацій щодо покращення ефективності та експлуатаційних характеристик системи рульового керування тролейбусу.

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасних та перспективних конструкцій підсилювачів рульового приводу транспортних засобів. За результатами аналізу визначено, що основним типом підсилювача рульового приводу, який застосовується на рухомому складі міського електричного транспорту є гідравлічний. Основною проблемою підсилювачів даного типу є їх низька енергоефективність. Це пов'язано з тим, що для забезпечення нормальної роботи гідропідсилювача електричний двигун приводу гідронасосу повинен постійно підтримувати тиск у гідросистемі, навіть тоді коли створювати додаткове зусилля для повороту керованих коліс не потрібно.

Відповідно щодо вимог до сучасних систем рульового керування вперше запропоновано науково-технічне рішення підвищення енергоефективності та

експлуатаційних характеристик системи рульового керування тролейбусу за рахунок використання у конструкції рульового приводу електричного підсилювача на базі двигуна з ротором що котиться. Таке рішення дозволяє: спростити конструкцію підсилювача рульового приводу; задіяти підсилювач лише у моменти, коли необхідно створювати додаткове зусилля при повороті керованих коліс. Обґрунтовано доцільність використання двигуна з ротором що котиться.

У другому розділі для дослідження та удосконалення системи рульового керування міських тролейбусів категорії МЗ у якості рухомого складу розглядається тролейбус ЛАЗ-Е183D1 та його модифікації. Визначено його основні геометричні та масогабаритні параметри, а також параметри підвіски керованих коліс. Визначено момент опору повороту керованих коліс при максимально-допустимому навантаженні на керовану вісь тролейбусу.

За спрощеною методикою проведено розрахунок двигуна з ротором що котиться для підсилювача рульового приводу тролейбусу, за результатами якого визначені геометричні параметри магнітопроводу статора та ротора двигуна, ексцентриситет, номінальний електромагнітний момент, кількість полюсів, номінальний струм та кількість витків котушки полюсу, номінальну частоту обертання вихідного валу двигуна.

Удосконалено метод визначення магнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться, особливість якого полягає у використанні методу скінченних елементів в плоско-паралельній постановці задачі для розрахунку магнітного поля полюсів двигуна з подальшим проведенням регресійного аналізу за допомогою апроксимації інтерполяційними кубічними сплайнами та обчисленням потокозчеплення, диференціальної індуктивності, коефіцієнту проти-ЕРС, радіальної і тангенціальної складових магнітної сили.

Визначено, що для створення номінального обертального моменту розрахованого двигуна з ротором що котиться, при мінімальному споживанні електричної енергії, оптимальною є одночасна узгоджена комутація котушок статора на проміжку від  $0^\circ$  до  $135^\circ$  відносно точки мінімального магнітного

зазору між ротором та статором двигуна. Це дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи рульового керування.

Запропоновано та науково обґрунтовано концепцію удосконалення системи рульового керування тролейбусу. Запропонована концепція дозволяє без суттєвих змін у конструкції рульового керування відомих тролейбусів проводити їх модернізацію з покращенням експлуатаційних характеристик.

Третій розділ присвячено математичній моделі рульового керування тролейбусу. Створено структурну схему рульового керування тролейбусу з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться. Визначено основні функціональні можливості системи рульового керування тролейбусу та зазначено порядок взаємодії елементів системи. Розроблено функціональні схеми елементів системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

Удосконалено математичну модель системи рульового керування тролейбусу, особливістю якої є врахування масогабаритних характеристик та швидкості руху тролейбусу, геометричних параметрів рульового приводу, моменту опору при повороті керованих коліс, а також попередньо розрахованих, методом скінченних елементів, електромагнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться.

Четвертий розділ присвячено дослідженню системи рульового керування з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться. Розроблено імітаційну модель системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться, яка дозволяє проводити дослідження електромеханічних та енергетичних характеристик системи відповідно щодо факторів обумовлених умовами та режимами руху. Імітаційна модель складається з моделей: системи керування, двигуна з ротором що котиться, механічної частини рульового приводу та враховує специфіку зміни моменту опору при повороті керованих коліс.

За результатами моделювання визначено, що:

– при повороті керованих коліс на місці з рівномірним обертанням рульового колеса, при максимально-допустимому навантаженні на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс не перевищує 0,011 рад; відхилення від заданої частоти обертання вихідного валу двигуна складає не більше 10 %; при цьому момент опору на рульовому колесі не перевищує 107 Н·м; максимальний споживаний струм підсилювача складає 21 А; максимальна споживана потужність з електричної мережі при цьому не перевищує 2800 Вт.

– при повороті керованих коліс з динамічною зміною частоти обертання рульового колеса, при максимально-допустимому навантаженні на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс не перевищує 0,019 рад; час перехідного процесу у моменти зміни частоти обертання вихідного валу двигуна не перевищує 0,02 с.

– максимальна потужність, яку споживає електропідсилювач на базі двигуна з ротором що котиться, на швидкостях руху тролейбусу близьких до 1 м/с та частоті обертання рульового колеса 0,65 об/с, складає 1080 Вт; зменшення частоти обертання рульового колеса та/або збільшення швидкості руху тролейбусу призводить до зменшення споживаної потужності.

За результатами порівняльного аналізу визначено, що за рахунок використання електричного підсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться, споживання електричної енергії зменшилося з 2,1563 МДж (0,598 кВт·год) до 0,8565 МДж (0,237 кВт·год) – на 60,4% за рахунок відсутності споживання енергії на прямих ділянках руху тролейбуса та у моменти простою на зупиночних пунктах або регульованих перехрестях. Річна економія електроенергії при цьому може сягати до 4680 МДж (1,3 МВт·год).

Розроблені рекомендації щодо застосування електричного підсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться у конструкції сучасних тролейбусів, що використовуються на підприємствах міського електричного транспорту України.

Практичне значення дисертаційної роботи підтверджено актами про впровадження ряду результатів роботи у Комунальному підприємстві «Тролейбусне депо» №2 (м. Харків) та у навчальному процесі на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Практичне значення дисертаційної роботи характеризують патенти України на корисні моделі «Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту» та «Рульове керування тролейбуса з електромеханічним підсилювачем керма».

**Ключові слова:** електричний транспорт, тролейбус, рульове керування, електропідсилювач керма, енергоефективність, електричний двигун з ротором що котиться, магнітний потік, імітаційне моделювання.

## ABSTRACT

*Aharkov I. V.* Improving the trolleybus steering system by using a rolling rotor switched reluctance motor. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of the Doctor of Philosophy on a specialty 275 – Transport Technology (by type), educational-scientific programme Transport technology. Electric transport, – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, 2022.

The dissertation is dedicated to the solution of a scientific and practical task, which consists in the research and improvement of the trolleybus steering system using a rolling rotor switched reluctance motor, substantiating theoretical provisions, the development of methodological approaches and scientific and practical recommendations for improving of the efficiency and operational characteristics of the trolleybus steering system.

The introduction substantiates the relevance and expediency of the dissertation, formulates the goal and tasks, defines the object, subject and research methods, scientific novelty and practical significance of the work.

In the first section, an analysis of modern and promising designs of steering of the vehicles is carried out. As a result of the analysis, it was determined that the main type of the steering amplifier used in the rolling stock of urban electric transport is hydraulic. The main problem of the amplifiers of this type is their low energy efficiency. This is due to the fact that in order to ensure the normal operation of the hydraulic power steering, the electric motor of the hydraulic pump drive must constantly maintain the pressure in the hydraulic system, even when it is not necessary to create additional effort to turning the wheels.

In accordance with the requirements for modern steering systems, a scientific and technical solution for increasing the energy efficiency and operational characteristics of the trolleybus steering system was proposed. The essence of this solution is to use a rolling rotor switched reluctance motor like an electric power steering. This solution allows: to simplify the design of the steering system; use the

electric power steering only when it is necessary to create additional force when turning the wheels. The expediency of using a rolling rotor switched reluctance motor is substantiated.

In the second section, the LAZ-E183D1 trolleybus (and its modifications) are considered as a rolling stock for research and improvement of the steering system of M3 vehicle category. The main geometrical and weight-dimensional parameters, and the parameters of the suspension of the trolleybus, were determined. The wheel torque of resistance at the maximum permissible load on the axle of the trolleybus is determined.

According to a simplified method, the calculation of a rolling rotor switched reluctance motor for the trolleybus electric power steering was carried out. As a result, the geometric parameters of the stator and rotor magnetic core, eccentricity, nominal electromagnetic torque, number of poles, nominal current and number of turns of the pole coil, nominal shaft speed were determined.

The method of determining the magnetic and mechanical parameters of a rolling rotor switched reluctance motor has been improved, the feature of which is using the finite element method to calculate the magnetic field, followed by using cubic spline interpolation and calculation of flux, differential inductance, back EMF coefficient, the radial and tangential components of the magnetic force.

It was determined that in order to create the nominal torque of the calculated rolling rotor switched reluctance motor with minimal electricity consumption, the optimal simultaneous and coordinated switching of the stator coils in the interval from  $0^\circ$  to  $135^\circ$  relative to the point of minimum air gap between the rotor and stator. This allows to increase the overall efficiency of the trolleybus steering system.

The concept of improving the trolleybus steering system is proposed and scientifically substantiated. The proposed concept makes it possible to modernize well-known trolleybuses with improved performance without significant changes in the steering system.

The third section is devoted to the mathematical model of trolleybus steering. The structural diagram of the trolleybus steering with an electric power steering based on the rolling rotor switched reluctance motor has been created. The basic



functionality of the trolleybus steering is defined and the order of interaction of the system elements is specified. The functional diagrams of the elements of the trolleybus steering with the electric power steering based on the rolling rotor switched reluctance motor have been created.

The mathematical model of the trolleybus steering system has been improved, the feature of which is taking into account the mass-dimensional characteristics and speed of the trolleybus, the steering geometry parameters, the wheel torque of resistance, and pre-calculated by the finite element method, electromagnetic and mechanical parameters of the rolling rotor switched reluctance motor.

The fourth section is devoted to research of the trolleybus steering system based on the rolling rotor switched reluctance motor. A simulation model of the trolleybus steering with an electric power steering based on a rolling rotor switched reluctance motor has been developed, which allows for research of electromechanical properties and energy efficiency of the system, respectively to factors determined by conditions and driving modes. The simulation model consists of the following models: the control system, the rolling rotor switched reluctance motor, the mechanical part of the steering that takes into account the specifics of change the wheel torque of resistance.

The simulation results show that:

- when turning steering wheel with constant rotation speed, when the vehicle stays in place with the maximum permissible load on the axle, the absolute error of the angle of rotation of the vehicle wheels does not exceed 0.011 rad; the specified rotation speed deviation from the shaft speed does not exceed 10%; the torque of resistance on the steering wheel does not exceed 107 N·m; the maximum current consumption of the electric power steering is 21 A; the maximum power consumption of the electric power steering does not exceed 2800 W.
- when turning steering wheel with dynamic rotation speed, when the vehicle stays in place with the maximum permissible load on the axle, the absolute error of the angle of rotation of the vehicle wheels does not exceed 0.019 rad; and the transient time does not exceed 0.02 s;

– the maximum power consumed by an electric power steering based on a rolling rotor switched reluctance motor at trolleybus speeds close to 1 m/s and a steering wheel rotation speed of 0.65 rpm is 1080 W; reducing the steering wheel rotation speed and/or increasing the trolleybus speed leads to a decrease in power consumption.

As a result of the comparative analysis, it was determined that using an electric power steering based on a rolling rotor switched reluctance motor, allows to reduce the electric energy consumption from 2.1563 MJ (0.598 kWh) to 0.8565 MJ (0.237 kWh) – by 60.4% due to the no energy consumption on straight sections of the road and during moments of idleness at stops or controlled intersections. Wherein the annual energy savings can reach up to 4680 MJ (1.3 MW·h).

Recommendations for the use of an electric power steering based on a rolling rotor switched reluctance motor in the design of modern trolleybuses which used in urban electric transport enterprises of Ukraine have been developed.

The practical significance of the dissertation is confirmed by the acts of implementation a part of results of the dissertation at Communal Enterprises "Troleibusne depo №2" (Trolleybus depot №2) and in the educational process at the Department of Electric Transport of the O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

The practical significance of the dissertation is defined by patents of Ukraine for utility models «Prystrij dlja vymiriuvannia mekhanichnoi potuzhnosti ta koefitsiienta korysnoi dii elektrodvyhuna na bazi datchyka krutnoho momentu» (Device for measuring mechanical power and efficiency of an electric motor based on a torque sensor) and «Rulove keruvannia troleibusa z elektromekhanichnym pidsyliuvachem kerma» (Trolleybus steering with an electromechanical power steering).

**Keywords:** electric transport, trolleybus, steering, electric power steering, energy efficiency, rolling rotor switched reluctance motor, magnetic flux, simulation.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

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. (особистий внесок здобувача: визначені основні недоліки гідропідсилювачів рульового керування, сформовані вимоги до електронпідсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться).

2. Агарков І. В. Визначення механічних параметрів електричного підсилювача керма у системі рульового керування троллейбусу. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*,. 2020. № 35. С. 52–59.

3. Скуріхін В. І., Сорока К. О., Агарков І. В. Математичне моделювання електронпідсилювача керма транспортного засобу з черв'ячною передачею. *Міжнародний журнал «Світлотехніка та Електроенергетика»*. 2020. № 59. С. 101–107. (особистий внесок здобувача: проведено аналіз електронпідсилювачів рульового керування та систематизовано елементи електронпідсилювача за функціональним призначенням).

4. Агарков І. В. Моделювання рульового керування троллейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі електродвигуна з ротором, що котиться. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*,. 2021. № 38. С. 88–106.

### Наукові праці у виданнях іноземних держав або у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних:

5. 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. (особистий внесок здобувача: удосконалено математичну модель рульового

керування тролейбусу, особливість якої полягає у використанні електронідсилювача на базі двигуна з ротором що котиться, проведено імітаційне моделювання роботи електронідсилювача).

### **Праці апробаційного характеру:**

6. Агарков І. В. Перспективні рішення проблем системи рульового керування тролейбусів. *Сучасний рух науки* : тези доп. IV міжнар. науково-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 6–7 груд. 2018 р. С. 4–7.2 (особистий внесок здобувача: обґрунтовано рішення підвищення ефективності системи рульового керування тролейбусу за рахунок впровадження у конструкцію рульового приводу електронідсилювача на базі двигуна з ротором що котиться).

7. Агарков І. В., Павленко Т. П., Скуріхін В. І. Електричний підсилювач для рульового керування тролейбусу. «Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні»: Наук. пр. Міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 15–18 жовт. 2019 р. С. 18–21. (особистий внесок здобувача: проведено порівняльний аналіз гідравлічної та електричної систем рульового керування з використанням методів математичного моделювання).

8. Aharkov I. V. Transient processes in the trolleybus steering system. *Young Researchers in the Global World : Vistas and Challenges* : Book of Papers of the International Forum for Young Researchers, Kharkiv, 11 April 2019. P. 144–146. (особистий внесок здобувача: визначено порядок взаємодії між елементами моделі електронідсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться).

9. Агарков І. В., Павленко Т. П. Моделювання електричного підсилювача рульового керування тролейбусу. *Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту*: Всеукр. науково-практ. конф., м. Харків, 14–16 квіт. 2021 р. С. 23–27. (особистий внесок здобувача: проведено імітаційне моделювання системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться).

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

10. Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту : пат. 124531 Україна : G01L 3/00. № u201711374 ; заявл. 20.11.2017 ; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7/2018. *(особистий внесок здобувача: проведено патентний пошук, узагальнено методи покращення роботи датчиків крутного моменту).*

11. Рульове керування тролейбуса з електромеханічним підсилювачем керма : пат. 139523 Україна : B62D 1/00. № u201906457 ; заявл. 10.06.2019 ; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1/2020. *(особистий внесок здобувача: визначені функціональні можливості електронісилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться).*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	17
ВСТУП .....	18
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИРІШЕННЯ.</b>	
<b>ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>25</b>
1.1. Структура системи рульового керування транспортних засобів .....	25
1.2 Особливості конструктивних виконань підсилювачів рульового приводу.....	29
1.2.1 Особливості конструкції пневматичних підсилювачів.....	29
1.2.2 Особливості конструкції гідравлічних підсилювачів .....	30
1.2.3 Особливості конструкції електричних підсилювачів.....	34
1.3 Огляд сучасних систем рульового керування транспортних засобів....	36
1.3.1 Системи рульового керування, які застосовуються на тролейбусах.....	38
1.3.2 Перспективні електромеханічні підсилювачі рульового приводу..	40
1.3.3 Сучасні електромеханічні підсилювачі рульового приводу. ....	42
1.4 Недоліки в конструкції рульового керування сучасних транспортних засобів.....	43
1.5 Перспективне рішення удосконалення системи рульового керування тролейбусу. ....	44
Висновки за розділом 1 .....	50
<b>РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСУ .....</b>	
2.1 Визначення характеристик предмету дослідження.....	54
2.1.1 Визначення параметрів рухомого складу.....	54
2.1.2 Визначення моменту опору повороту керованих коліс. ....	56
2.1.3 Розрахунок параметрів ДРК.....	61
2.2 Дослідження магнітного поля ДРК.....	70

	15
2.2.1 Методи розрахунку магнітного поля. ....	70
2.2.2 Основні положення методу скінченних елементів.....	73
2.2.3 Інструменти розрахунку та моделювання магнітного поля. ....	77
2.2.4 Моделювання магнітного поля ДРК. ....	77
2.2.5 Методи регресійного аналізу розрахункових даних. ....	86
2.2.6 Математична модель магнітного поля ДРК.....	89
2.2.7 Визначення оптимальної кількості зкомутованих котушок статора, які створюють номінальний обертальний момент. ....	96
2.3 Особливості конструкції системи рульового керування тролейбусу з використанням ДРК. ....	99
Висновки за розділом 2 .....	108
<b>РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ЕЛЕКТРОПІДСИЛЮВАЧЕМ РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ</b>	
<b>111</b>	
3.1 Методи математичного моделювання системи рульового керування тролейбусу .....	111
3.2 Розробка структурної схеми рульового керування з електропідсилювачем на базі ДРК .....	113
3.3 Математична модель підсилювача рульового приводу тролейбусу....	115
3.3.1 Механічні перетворення енергії ДРК. ....	115
3.3.2 Електромагнітні перетворення енергії ДРК.....	119
3.4 Математична модель механічної частини рульового приводу тролейбусу. ....	121
3.5 Розробка функціональних схем системи рульового керування тролейбусу та узагальнення її математичної моделі.....	131
Висновки за розділом 3 .....	137
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСУ З ПІДСИЛЮВАЧЕМ РП НА БАЗІ ДРК</b>	
<b>138</b>	
4.1 Інструменти розрахунку та моделювання системи рульового керування тролейбусу. ....	138
4.2 Імітаційна модель системи рульового керування тролейбусу .....	140

4.3	Моделювання роботи системи рульового керування тролейбусу .....	150
4.3.1	Визначення початкових умов та припущень. ....	150
4.3.2	Моделювання системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса на місці. ....	151
4.3.3	Моделювання системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса... ..	160
4.4	Оцінка ефективності електричного підсилювача рульового приводу.	165
4.4.1	Дослідження енергоефективності електропідсилювача РП на базі ДРК.....	165
4.4.2	Порівняльний аналіз споживання електричної енергії гідравлічного підсилювача РП з електричним підсилювачем РП на базі ДРК. ....	167
4.5	Рекомендації щодо застосування підсилювача РП на базі ДРК у конструкції сучасних тролейбусів.....	172
	Висновки за розділом 4 .....	174
	ВИСНОВКИ .....	176
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	179
	ДОДАТОК А Макрос розрахунку магнітного поля полюсу ДРК.....	197
	ДОДАТОК Б Результати розрахунку магнітного потоку, магнітної сили та її складових полюсу ДРК.....	201
	ДОДАТОК В Результати розрахунку магнітної сили ДРК та її складових відносно кількості зкомутованих груп котушок статора.....	217
	ДОДАТОК Г Список початкових параметрів для налаштування роботи імітаційної моделі системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК.....	219
	ДОДАТОК І Результати розрахунку споживаної потужності підсилювача РП на базі ДРК.....	220
	ДОДАТОК Д Акти впровадження.....	226
	ДОДАТОК Е Патенти України на корисну модель.....	228
	ДОДАТОК Є Список публікацій здобувача.....	230



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДРК – двигун з ротором що котиться

проти-ЕРС – протидіюча електрорушійна сила

МРС – магніто-рушійна сила

СОМТ – сила одностороннього магнітного тяжіння

РП – рульовий привід

МЕТ – міський електричний транспорт

ЕП – електричний привід

ТЗ – транспортний засіб

РМ – рульовий механізм

ДПР – датчик положення ротора

ККД – коефіцієнт корисної дії

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В сучасних умовах урбанізації все більше уваги приділяється розвитку транспортної інфраструктури міст та вимогам щодо підвищення ефективності роботи транспортних засобів та транспортних підприємств. Інтенсивне зростання обсягів пасажирських перевезень для забезпечення мобільності населення на ряду з посиленням екологічних норм призвели до збільшення ролі електричного транспорту. Сьогодні понад 45 % від загального об'єму пасажирських перевезень у великих містах України забезпечується за допомогою електричного транспорту, зокрема тролейбусом.

Сучасний низькопідлоговий тролейбус відповідає багатьом вимогам щодо безпеки, комфортабельності та екологічності. Однак даний вид транспорту все ще потребує впровадження сучасних науково-технічних рішень в конструкції окремих вузлів та агрегатів. Особлива увага приділяється тим елементам у конструкції тролейбусів, які безпосередньо впливають на рівень його енергоефективності під час експлуатації.

Одним із напрямлень для покращення енергоефективності та експлуатаційних характеристик тролейбусів є удосконалення системи рульового керування.

У конструкції рульового керування сучасних тролейбусів для зменшення навантаження на водія та підвищення комфорту під час керування транспортним засобом застосовують гідравлічні підсилювачі рульового приводу. Даний тип підсилювачів забезпечує високі показники стійкості та керованості при високих швидкостях руху. За рахунок своїх відносно невеликих габаритних розмірів дозволяє встановлювати його у підкузовному просторі низькопідлогових тролейбусів. Однак робота гідропідсилювача рульового приводу пов'язана з необхідністю постійно підтримувати тиск у гідросистемі, навіть тоді коли створювати додаткове зусилля для повороту керованих коліс не потрібно. Це призводить до того, що електричний двигун

гідронасосу підсилювача постійно споживає електричну енергію незалежно від умов руху. Такі особливості роботи гідропідсилювачів спонукають до пошуку варіантів альтернативних конструктивних виконань підсилювачів рульового приводу.

**Актуальність теми** роботи обумовлена необхідністю підвищення енергоефективності та експлуатаційних характеристик системи рульового керування при зростанні інтенсивності дорожнього руху у містах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова та є складовою науково-дослідних тем, зокрема: I етап, а також II етап науково-дослідної теми «Шляхи вдосконалення електромехатронних засобів та їхніх складників» (ДР № 0120U104695).

**Мета роботи** полягає в дослідженні та удосконаленні рульового керування тролейбусу для підвищення його ефективності та експлуатаційних характеристик за рахунок використання електричного підсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

Для досягнення мети роботи поставлені наступні **задачі дослідження**:

- провести аналіз систем рульового керування тролейбусів, визначити їхні проблеми і запропонувати шляхи їх вирішення;
- обґрунтувати методи та засоби дослідження системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться, з урахуванням особливостей його роботи та взаємодії з конструктивними елементами рульового приводу;
- визначити характеристики предмету дослідження;
- провести розрахунок двигуна з ротором що котиться з необхідними параметрами;
- розробити математичну та імітаційну моделі рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться;

– провести дослідження роботи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться за різних умов та режимів руху;

– визначити ефективність роботи системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться і розробити рекомендації щодо його застосування.

*Об'єкт дослідження:* електромеханічні процеси у підсилювачі рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться та енергетичні показники системи рульового керування тролейбусу.

*Предмет дослідження:* електромеханічний підсилювач рульового приводу тролейбусу та способи підвищення ефективності його роботи.

**Методи дослідження.** Науково-теоретичні дослідження параметрів та характеристик системи рульового керування тролейбусу на базі двигуна з ротором, що котиться засновані на фундаментальних наукових положеннях моделювання та дослідження електромеханічних систем. Для розрахунку магнітного поля двигуна з ротором, що котиться використовувався метод скінченних елементів у плоско-паралельній постановці задачі. Для дослідження динамічних процесів системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться та створення імітаційної моделі використовувались чисельні методи з розв'язанням системи нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь. Апроксимація дискретних експериментальних даних цифрового моделювання відбувалась з використанням методів наближення функцій на основі інтерполяції кубічними сплайнами. Імітаційне моделювання, яке застосовується для дослідження роботи рульового приводу та підтвердження адекватності розроблених математичних моделей.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– **вперше** запропоновано науково-технічне рішення підвищення енергоефективності та експлуатаційних характеристик системи рульового керування тролейбуса за рахунок використання електропідсилювача

рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться. Таке рішення дозволяє задіяти підсилювач лише у моменти, коли необхідно створювати додаткове зусилля при повороті керованих коліс;

– **удосконалено** метод визначення магнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться. **Особливістю** методу є розрахунок магнітного поля полюсів двигуна методом скінченних елементів в плоско-паралельній постановці задачі з подальшим проведенням регресійного аналізу та обчисленням потокозчеплення, диференціальної індуктивності, коефіцієнту проти-ЕРС, радіальної і тангенціальної складових магнітної сили;

– **удосконалено** математичну модель рульового керування тролейбусу. **Особливістю** математичної моделі є врахування попередньо розрахованих, методом скінченних елементів, електромагнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться;

– **здобула подальшого розвитку** імітаційна модель рульового керування тролейбусу, що поєднує моделі системи керування, двигуна з ротором що котиться, механічної частини рульового приводу з визначенням моменту опору повороту керованих коліс. **Особливістю** імітаційної моделі полягає у можливості проведення аналізу роботи та визначення енергетичних показників системи рульового керування відповідно щодо факторів обумовлених умовами та режимами руху. **Це дозволяє** використовувати її для дослідження та проектування систем рульового керування транспортних засобів.

– **встановлено**, що потенційна економія електричної енергії від застосування електропідсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться у порівнянні з аналогами на базі гідропідсилювачів складає до 60 % за рахунок відсутності споживання енергії на прямих ділянках руху тролейбуса та у моменти простою на зупиночних пунктах або регульованих перехрестях.

### **Практичне значення одержаних результатів полягає у:**

- розробці практичних рішень щодо підвищення ефективності системи рульового керування тролейбусу шляхом використання у якості підсилювача рульового приводу електричного двигуна з ротором що котиться. Така система рульового керування характеризується покращеними параметрами, зокрема: високим питомим крутним моментом при низькій частоті обертання; низьким пусковим та струмам короткого замикання, на рівні 1,1–3 від номінального значення струму обмотки статора, здатністю тривалий час працювати «на упор»; високій швидкодії (часу розгону та зупинки 0,01–0,05 с), відсутність самоходу, «вибігу», здатність працювати в режимі електромагнітного гальма; економії до 60 % електроенергії за рахунок відсутності її споживання у моменти коли створювати додаткове зусилля для повороту керованих коліс не має потреби;
- відсутності гідравлічної системи на тролейбусі, яка використовується тільки для забезпечення роботи рульового керування та зменшує загальні показники надійності тролейбусів,
- можливості створювати значний обертальний момент при збереженні відносно невеликих габаритних розмірів у порівнянні з відомими електромеханічними системами рульового керування аналогічного класу;
- обґрунтуванні методик розрахунку рульового керування при його розробці та випробуваннях.

Практичне значення дисертаційної роботи характеризують патенти на корисні моделі «Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту» та «Рульове керування тролейбуса з електромеханічним підсилювачем керма» (Додаток Е).

Практичне значення роботи також підтверджена актами про впровадження ряду результатів роботи у Комунальному підприємстві «Тролейбусне депо № 2» (м. Харків), та у навчальний процес ХНУМГ імені О.М. Бекетова (Додаток Д).

**Особистий внесок здобувача.** У роботі науково обґрунтовано можливість створення безредукторного електропідсилювача рульового приводу тролейбусу на основі електричного двигуна з ротором що котиться. Положення та результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та викладені у працях [1] – [11]. Серед яких:

- аналіз конструкцій відомих та перспективних підсилювачів рульового приводу сучасного рухомого складу міського електричного транспорту, визначення задач дослідження;
- удосконалення методу визначення магнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться;
- розрахунок двигуна з ротором що котиться для системи рульового керування тролейбусу, визначення його електромагнітних та механічних характеристик;
- удосконалення математичної моделі системи рульового керування тролейбусу, особливістю якої є електропідсилювач рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться;
- удосконалення та розробка компонентів імітаційної моделі системи рульового керування з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться;
- проведення експериментального дослідження роботи системи рульового керування тролейбусу з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться за різних умов руху шляхом імітаційного моделювання;
- визначення енергетичної ефективності електропідсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться за різних умов руху та розробка рекомендацій щодо його використання.

**Апробація результатів дослідження.**

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях та симпозіумах:

- IV міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Сучасний рух науки», м. Дніпро, 6–7 груд. 2018 р.;
- V International forum for young researchers «Young Researchers in the Global World: Vistas and Challenges», Kharkiv, 11 April 2019;
- міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні», м. Харків, 15–18 жовт. 2019 р.
- всеукраїнській науково-практичній конференції «Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту», ., м. Харків, 14–16 квіт. 2021 р.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, серед яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 – у виданнях іноземних держав, які включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 – у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій, 2 патенти на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (160 найменувань на 18 сторінках) та 8 додатків (на 35 сторінках). Обсяг основного тексту дисертації становить 184 сторінки, включаючи: 88 рисунків по тексту, 5 таблиць по тексту. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 231 сторінку.



## **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИРІШЕННЯ. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ**

В представленому розділі наведено аналіз систем рульового керування тролейбусів та інших транспортних засобів. Визначено класифікацію систем рульового керування. Визначенні основні недоліки та переваги сучасних систем рульового керування, сформульовані напрямки їх вдосконалення та оптимізації, що дозволяє визначити мету та завдання дисертаційного дослідження. Проведено аналіз конструктивних рішень систем рульового керування тролейбусів, що відповідають сучасним вимогам. Визначені вимоги, які потрібно враховувати при модернізації існуючих та проектуванні перспективних систем рульового керування тролейбусів. Вперше запропоновано інноваційне науково-технічне рішення, яке дає змогу підвищення експлуатаційних характеристик під час роботи системи рульового керування тролейбусів, за рахунок використання електропідсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

### **1.1. Структура системи рульового керування транспортних засобів.**

Зручність керування транспортним засобом значною мірою впливає на безпеку дорожнього руху. Особливо з появою вантажних та пасажирських перевезень на безрейковому транспорті виникла проблема зменшення фізичного навантаження для водіїв при керуванні транспортними засобами [12–13].

Невисокі вимоги щодо керованості і комфорту спочатку дозволяли обходитися однією людською силою. В основному використовувалось рішення створення більшого передавального відношення приводу і діаметра рульового колеса. Це сприяло збільшенню числа оборотів керма, що у свою чергу зменшувало швидкодію і точність позиціонування керованих коліс такого рульового керування [14–16].

Збільшення швидкостей руху, вантажопідйомності, наявність складної дорожньої ситуації у містах, де водієві необхідно часом діяти доволі оперативно, посилили вимоги до системи рульового керування.

Для полегшення керування транспортним засобом на цей час застосовуються підсилювачі рульового керування, завдяки яким відбувається поворот керованих коліс легким і комфортним способом [17–18].

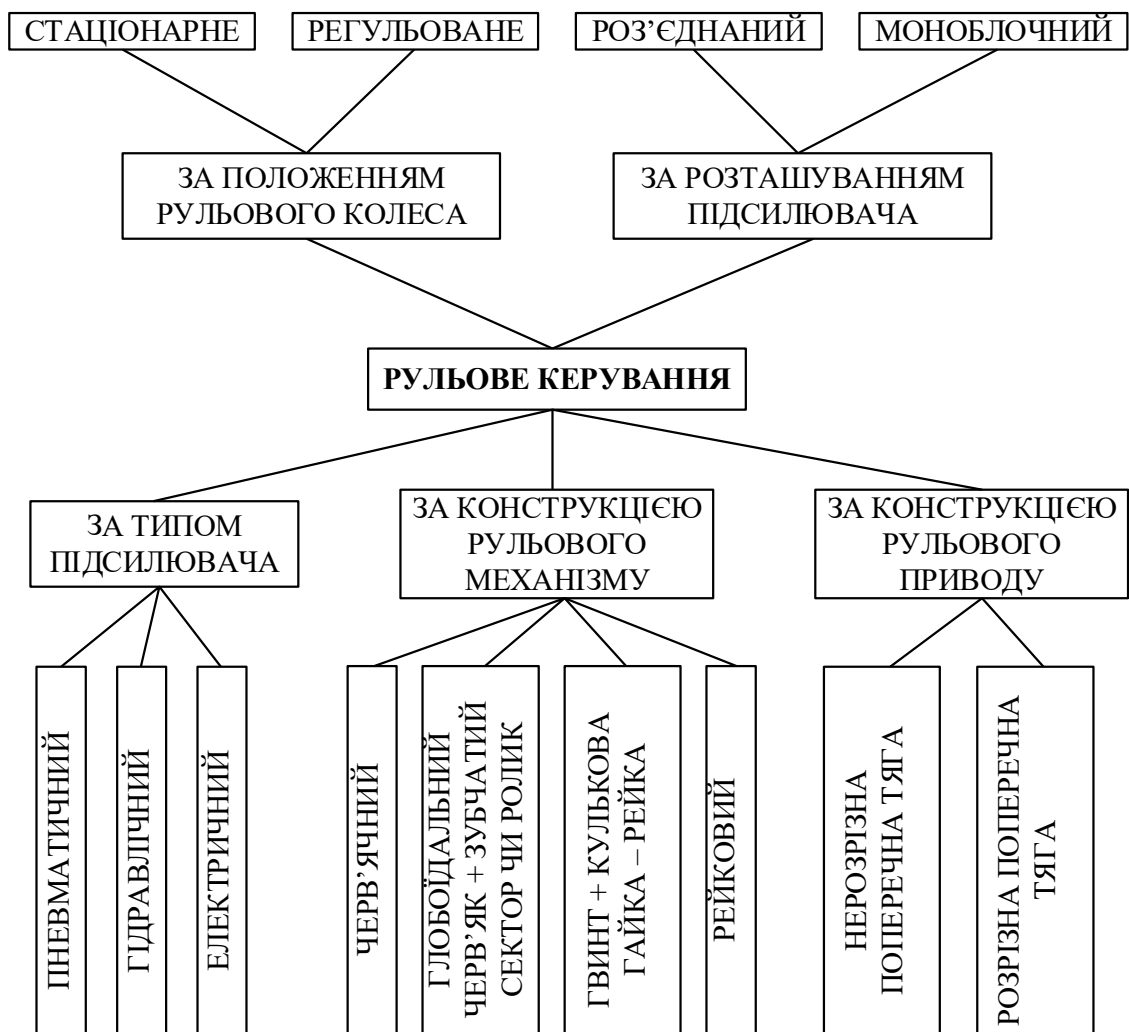


Рисунок 1.1 – Класифікація систем рульового керування [19].

Система рульового керування – сукупність механізмів та вузлів, призначенням яких є забезпечення руху транспортного засобу у заданому напрямку. У випадку тролейбуса рульове керування забезпечує необхідний поворот передніх керованих коліс для зміни напрямку його руху.

Сучасні системи рульового керування, які застосовуються у конструкції безколісного рухомому складу міського електричного транспорту, мають класифікацію (див. рис.1.1) у відповідності до конструктивних особливостей окремих вузлів та агрегатів [19–21].

Основними елементами системи рульового керування (див. рис.1.2) є рульовий механізм, рульовий привід, підсилювач рульового приводу.

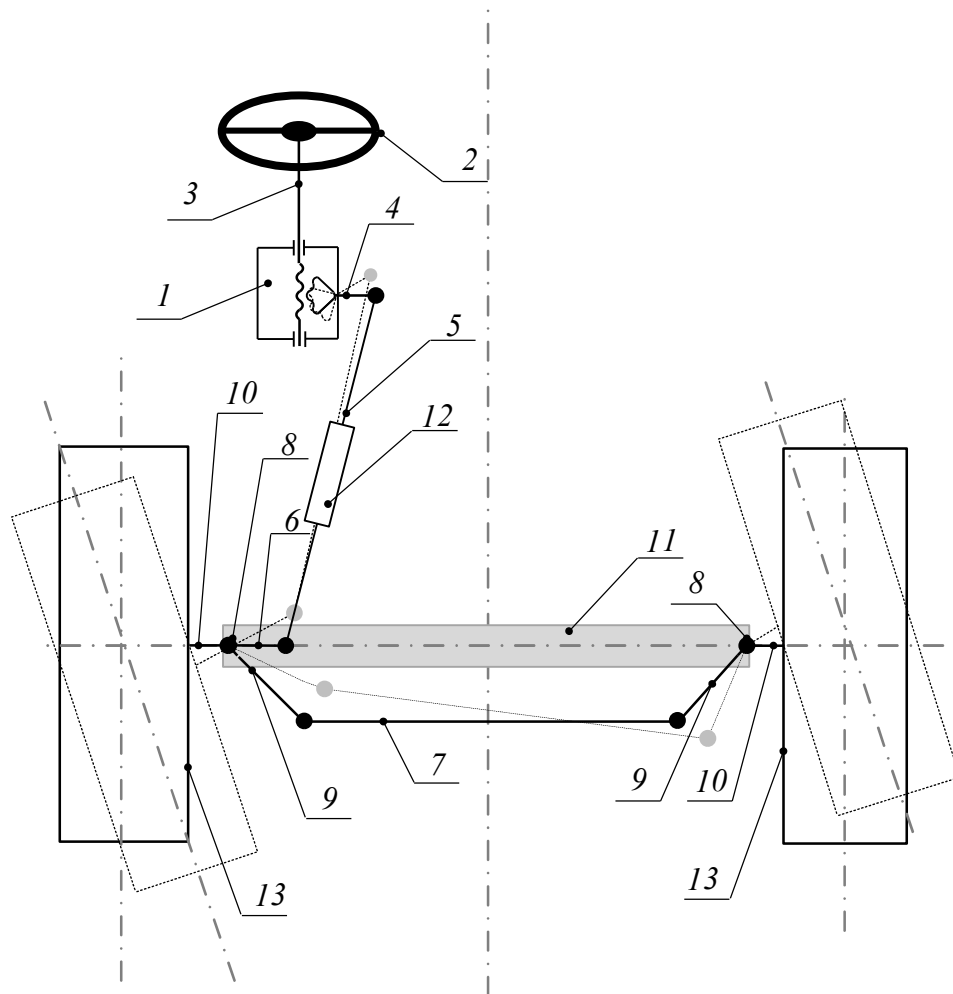


Рисунок 1.2 – Конструктивно-кінематична схема системи рульового керування:

1 – рульовий механізм; 2 – рульове колесо, 3 – рульовий вал; 4 – сошка (важіль рульового механізму); 5 – поздовжня рульова тяга; 6 – поворотний важіль; 7 – поперечна тяга; 8 – шворінь; 9 – важіль цапфи; 10 – цапфа; 11 – балка моста керованих коліс; 12 – підсилювач РП; 13 – керовані колеса.

Для забезпечення оптимального зусилля на рульовому колесі також використовуються слідкуючі системи, які забезпечують вчасне увімкнення підсилювача рульового приводу.

Рульовий механізм – це сповільнююча передача, яка перетворює обертання валу рульового колеса в обертання валу сошки. Цей механізм збільшує зусилля водія, що прикладається до рульового колеса і полегшує його роботу.

Рульовий механізм, у загальному сенсі, являє собою редуктор з великим передавальним числом [19, 21]. Конструктивно рульові редуктори пройшли декілька перехідних етапів модернізації. Спочатку рульовий механізм представляв із себе черв'ячний редуктор. Подальша модернізація сприяла отриманню конструкції із застосуванням механізмів, які мали глобоїдні черв'яки. У таких випадках черв'ячні колеса перетворились у сектори, оскільки за рахунок особливостей конструкції рульового керування робоча поверхня, як правило, обмежена декількома зубцями [22].

На цей час широке застосування отримали більш складні рульові механізми, робочою парою яких є гвинт – кулькова гайка – рейка. В конструкції такого рульового механізму тертя ковзання між черв'яком і черв'ячним колесом замінено на тертя катання між гвинтом і гайкою-рейкою. Таке рішення знижує опір під час роботи рульового механізму [22].

Перспективним направленням є створення конструкції рейкової рульової системи, яка поступово знаходить розповсюдження на автомобільному транспорті. Така конструкція має просте конструктивне виконання, що у свою чергу сприяє зменшенню зусиль під час обслуговування та ремонту [19, 22].

Рульовий привід в сукупності з рульовим механізмом здійснює поворот керованих коліс транспортного засобу за допомогою систем тяг та важелів. Завдяки використанню такої системи утворюється так звана рульова трапеція. Довжини плечей важелів, що входять в цю трапецію, підібрані таким чином,

щоб забезпечувати правильне співвідношення кутів повороту керованих коліс транспортного засобу [22].

Конструкція рульового приводу залежить від типу передньої підвіски. При незалежній підвісці керованих коліс поперечна рульова тяга створюється розрізною. Це необхідно для того, щоб рульовий привід не обмежував переміщення кожного з коліс, підвішених незалежно одне від іншого. В такому випадку поперечна рульова тяга виконана, наприклад, з двох або з трьох шарнірно-пов'язаних частин, що дозволяють колесам переміщатися незалежно одне від іншого [22].

При залежній підвісці керованих коліс, що застосовується на вантажних автомобілях, автобусах, тролейбусах рульовий привід має поздовжню і поперечну рульові тяги, які з'єднані з поворотними важелями. Поздовжня тяга закінчується попереду наконечником, в якому розміщується кульовий шарнір для кріплення з поворотним важелем лівої цапфи. Протилежний кінець поздовжньої тяги має шарнірне з'єднання з сошкою рульового приводу [18, 20, 22].

Для зменшення зусиль, необхідних для повороту рульового колеса, застосовується підсилювач рульового приводу. На сьогодні виділяють три основних типи підсилювачів рульового приводу: пневматичні, гідравлічні, електричні.

## **1.2 Особливості конструктивних виконань підсилювачів рульового приводу.**

### **1.2.1 Особливості конструкції пневматичних підсилювачів**

Робота пневматичного підсилювача базується на створенні сили за рахунок стисненого повітря, що впливає на додаткове зусилля у рульовому приводі, необхідного для повороту керованих коліс транспортного засобу. Такі підсилювачі застосовуються в основному на вантажних автомобілях

великої вантажопідйомності з пневматичною гальмівною системою, яка має у своїй конструкції додатковий повітряний балон [23–29].

Пневматичний підсилювач рульового приводу має суттєвий недолік, який покладено в принцип його дії. Робоче тіло, внаслідок високого стискування повітря, не забезпечує, без додаткових засобів, плавність і точність руху вихідних ланок при змінних навантаженнях на керованих колесах. Стискування повітря також не забезпечує безпосередньої фіксації робочих частин підсилювачів в заданих положеннях. Це призводить до запізнювання повороту керованих коліс щодо повороту рульового колеса, а також погіршує точність їх позиціонування. На сучасному рухомому складі пневматичний підсилювач рульового приводу майже не застосовується [27].

#### 1.2.2 Особливості конструкції гідравлічних підсилювачів

Робота гідравлічного підсилювача рульового приводу (рис. 1.3) за принципом дії схожа на роботу пневматичного підсилювача. Однак у якості робочого тіла для даного типу підсилювача використовується гідравлічна олива [30–36]. За рахунок цього він позбавлений основних недоліків підсилювачів пневматичного типу.

Гідравлічний підсилювач рульового приводу (див. рис. 1.3) працює наступним чином. Силовий циліндр гідропідсилювача змонтований разом з розподільником, що регулює потік рідини, яка надходить з насоса в силовий циліндр.

Основним елементом розподільника гідропідсилювача є золотник. У середині силового циліндра розміщений поршень, який переміщує шток. Під час роботи підсилювача рідина перекачується в розподільник з бачка насосної станції та в зворотному напрямку через трубку гідропідсилювача від гідронасоса на злив. В результаті створюється замкнутий цикл роботи гідропідсилювача [33, 37].

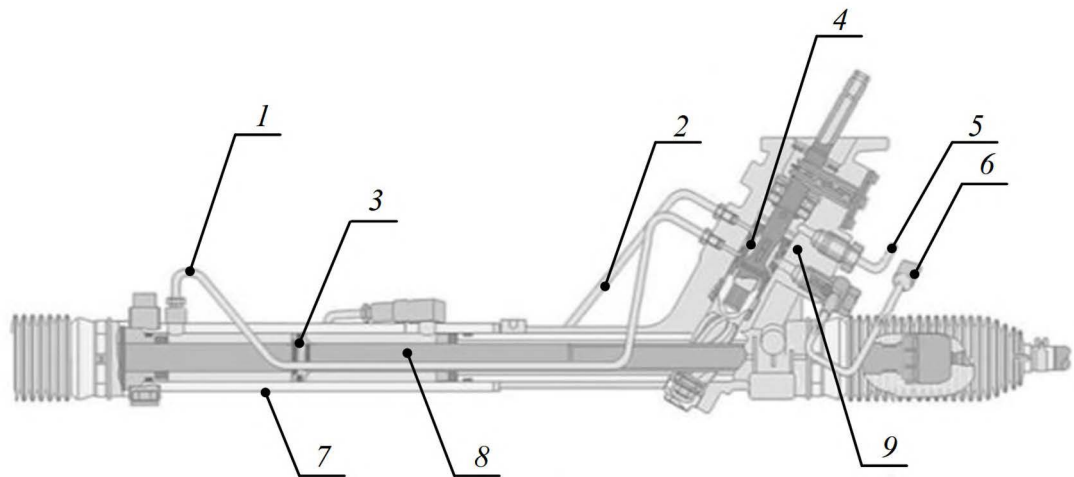


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд типового гідропідсилювача рульового приводу:

1 – гідролінія до лівої порожнини циліндра ; 2 – гідролінія до правої порожнини циліндра; 3 – поршень; 4 – золотник; 5 – трубка гідропідсилювача від гідронасоса; 6 – трубка від гідропідсилювача на злив; 7 – циліндр гідропідсилювача; 8 – шток; 9 – корпус розподільника.

Силовий циліндр передає тиск рідини через важіль підсилювача, поздовжню рульову тягу і важіль цапфи на рульову трапецію. Це полегшує роботу водія [22, 33, 35].

У момент, коли колеса транспортного засобу встановлені прямо гідропідсилювач не працює. Рідина перекачується з однієї порожнини силового циліндра в іншу через зворотний клапан, встановлений в корпусі розподільника, з бачка гідронасоса в розподільник і назад. Залежно від напрямку повороту рульового колеса рульова сошка переміщує золотник через передню поздовжню тягу. При досягненні певного моменту опору нагнітаюча і зливна порожнини в корпусі золотника відокремлюються і рідина починає надходити у відповідну порожнину силового циліндра.

Одночасно рідина з іншої порожнини циліндра видавлюється в зливну порожнину. З підвищенням опору повороту коліс тиск в робочій порожнині

силового циліндра збільшується. Внаслідок цього збільшується і тиск у відповідній реактивній камері золотника та зростає зусилля на рульовому колесі.

Рідина тисне на поршень зі штоком, за рахунок чого шток переміщується і передає зусилля на рульову трапецію. В результаті відбувається поворот керованих коліс. Якщо припинити обертання рульового колеса, то золотник займе нейтральне положення і гідروпідсилювач перестане працювати.

Зазвичай на рухомому складі застосовують гідравлічні насоси гідропідсилювача керма лопатевого типу (рис. 1.4) [37]. Насос має дві порожнини – нагнітання і всмоктування. Ротор насоса кріпиться на шліцах валу. Вал обертається в кулькових підшипниках, встановлених в корпусі насоса. У конструкції ротора передбачені пази, в яких вільно переміщаються лопаті. При обертанні валу, за рахунок відцентрової сили, лопаті притискаються до поверхні статора, утворюючи робочі камери, і витісняють гідравлічну рідину в порожнину нагнітання. У зв'язку з тим, що внутрішня поверхня статора має овальну форму при обертанні ротора обсяг робочих камер буде змінюватися. У зонах де відбувається збільшення обсягу камери виконаний отвір для всмоктування робочої рідини. В зонах зі зменшенням обсягу камери – отвір для нагнітання [37].

В насос вмонтований запобіжний клапан, який розраховується на певний тиск. Кулька перекриває отвір, що з'єднує нагнітальну і зливну порожнини під дією пружини, яка вбудована у конструкцію [37].



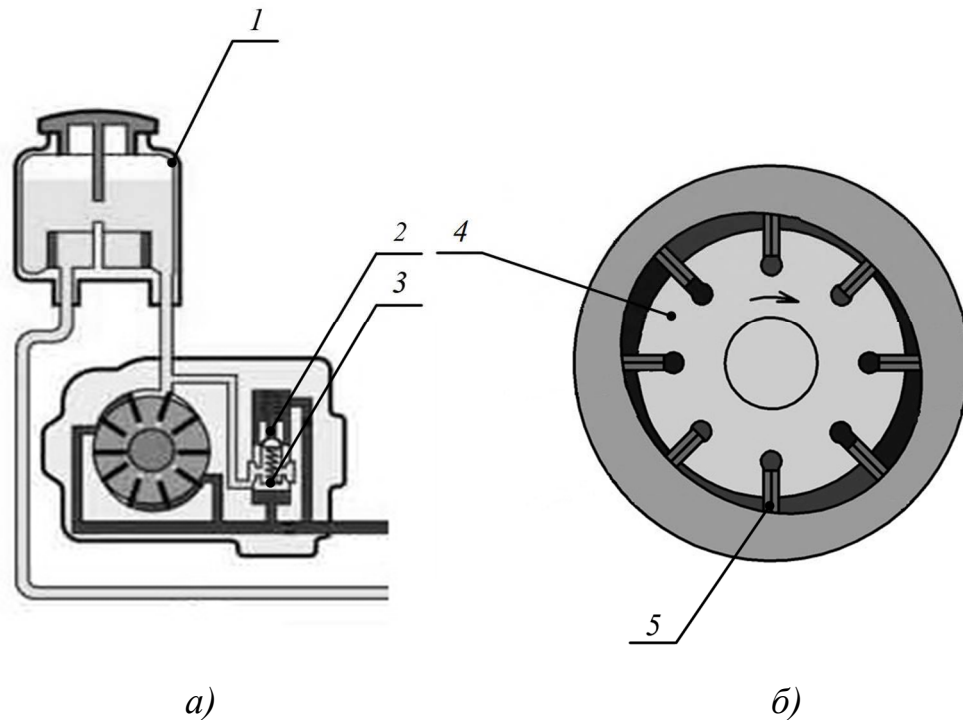


Рисунок 1.4 – Вигляд типового насосу гідропідсилювача рульового приводу:  
*а* – гідронасос гідропідсилювача з бачком; *б* – поперечний переріз робочої порожнини насоса; 1 – бачок; 2 – запобіжний клапан; 3 – перепускний клапан; 4 — ротор гідронасоса; 5 – лопать ротора гідронасоса.

У кришці насоса передбачений перепускний клапан, який відкривається при деякій різниці тисків в порожнинах нагнітання, що розділені каліброваним отвором на дві зони. Тиск в зоні, що примикає до диска, завжди вище, ніж в зоні, розташованій за каліброваним отвором.

Зі збільшенням частоти обертання насоса збільшується перепад тиску між зонами і перепускний клапан зміщується вправо, відкриваючи отвір в гнізді клапана, що з'єднує порожнину нагнітання із зливним бачком.

На рухомому складі електричного транспорту гідравлічний насос гідропідсилювача рульового приводу приводиться у рух за допомогою електричного двигуна. Двигун має низьковольтне живлення від бортової мережі транспортного засобу. Передача крутного моменту від електричного двигуна до гідравлічного насоса проводиться через еластичну муфту [32, 33].

### 1.2.3 Особливості конструкції електричних підсилювачів.

Планомірно зростаючі вимоги щодо безпеки руху, збільшення швидкостей та комфорту, використання сучасних напівпровідникових приладів призвели до збільшення ролі електроніки в автомобільних процесах. Це призвело до появи підсилювачів рульового приводу, у яких передбачається використання електроприводу.

Електричний підсилювач рульового приводу автомобіля, являє собою альтернативу гідравлічному. Конструктивно він складається з електричного двигуна, механічної передачі та системи керування (див. рис. 1.5) [38–46].

У якості електричного двигуна у конструкції електричного підсилювача рульового приводу застосовується асинхронний або синхронний електродвигун безконтактного типу, що забезпечує даному вузлу високу надійність [42, 35, 46].

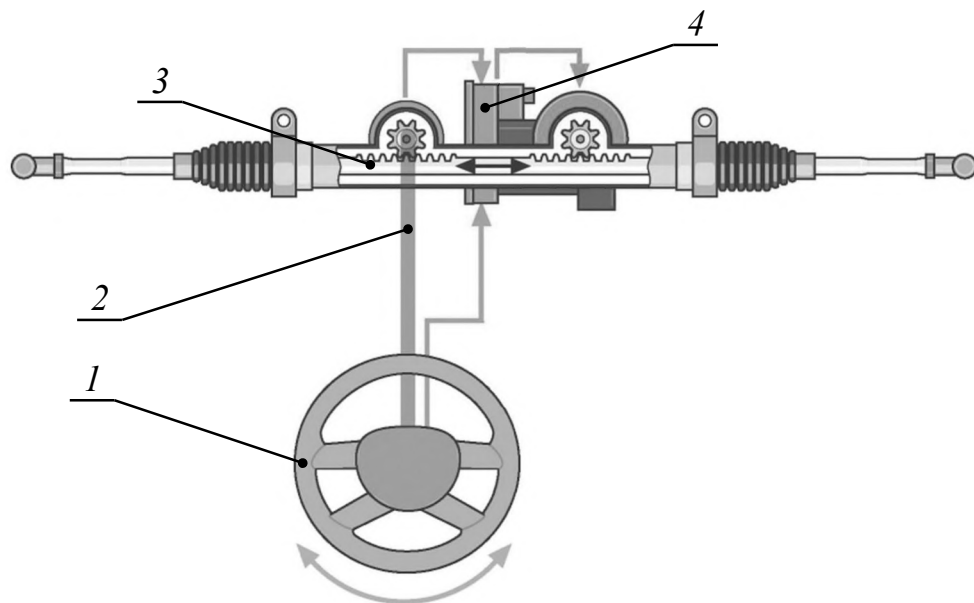


Рисунок 1.5 – Система рульового керування легкового автомобіля із електричним підсилювачем рульового приводу:

- 1 – рульове колесо; 2 – рульовий вал; 3 – рейковий рульовий механізм;  
4 – електропривод підсилювача з блоком керування.

Механічна силова передача електричного підсилювача рульового приводу представлена черв'ячними, шестерними або кулько-гвинтовими передачами. В цілому електричний двигун разом з механічною передачею називається сервоприводом [45].

Блок системи керування електричного підсилювача рульового приводу представляє собою інтелектуальну мікропроцесорну систему, яка контролює роботу сервоприводу. Така система виконує регулювання вихідних параметрів сервопривода орієнтуючись на показання датчиків, які застосовуються у конструкції електропідсилювача [38–44].

На крутний момент електричного двигуна підсилювача рульового приводу впливають параметри, що транслюються датчиками:

- крутного моменту на рульовому колесі,
- частоти обертання ротора електродвигуна,
- кута повороту рульового колеса,
- швидкості або частоти обертання керованих коліс (зазвичай встановленого в блоці антиблокувальної гальмівної системи),
- частоти обертання колінвалу (у транспортних засобах з двигунами внутрішнього згорання).

Завдяки повністю електрокерованій системі, електричний підсилювач рульового приводу вмикається у роботу тільки за необхідністю створити додатковий крутний момент для повороту керованих коліс, таким чином зменшуючи фізичне навантаження на водія транспортного засобу.

Під час повороту рульового колеса, торсіон, встановлений на рульовому валі скручуються. Датчик крутного моменту, який працює у парі з датчиком повороту рульового колеса, передає інформацію про напрямок повороту та прикладене зусилля щодо рульового колеса на блок системи керування електричним підсилювачем. Блок системи керування, в режимі реального часу, оброблює данні та співвідносить їх з показаннями інших датчиків системи. В результаті розраховується зусилля, яке необхідно прикласти, щоб допомогти водію транспортного засобу під час повороту керованих коліс.

### 1.3 Огляд сучасних систем рульового керування транспортних засобів

На більшості сучасних тролейбусів застосовується система рульового керування з гідравлічним підсилювачем рульового приводу. Тенденції розвитку та модернізації конструкції таких систем направлені на максимально можливе зменшення числа шарнірів, рівномірний розподіл опор пружних елементів і несучих вертикальне навантаження шарнірів по всій довжині тролейбуса. Це приводить до:

- зниження пружної маси транспортного засобу;
- підвищення поперечної жорсткості підвіски без збільшення її вертикальної жорсткості;
- зниження трудомісткості та часу технічного обслуговування вузлів і агрегатів;
- зниження висоти підлоги в салоні;
- підвищення маневреності рухомого складу за рахунок зменшення радіусу поворот.

Гідропідсилювачі тролейбусів загалом обираються з урахуванням характеристики (рис. 1.6), що мають велике значення при керуванні його рухом [17,21,22].

Як показано на характеристиці (див. рис. 1.6), необхідно виконання таких вимог (залежність 2), щоб у точці А було включення підсилювача, а в точці В його вимкнення. При цьому зусилля водія передається на рульову колонку і його величина забезпечує необхідну легкість керування (відчуття дороги) [22].

При надмірній потужності підсилювача (залежність 3) водій не може керувати зусиллям в залежності від кута повороту керованих коліс, що перешкоджає керуванню і знижує безпеку руху.

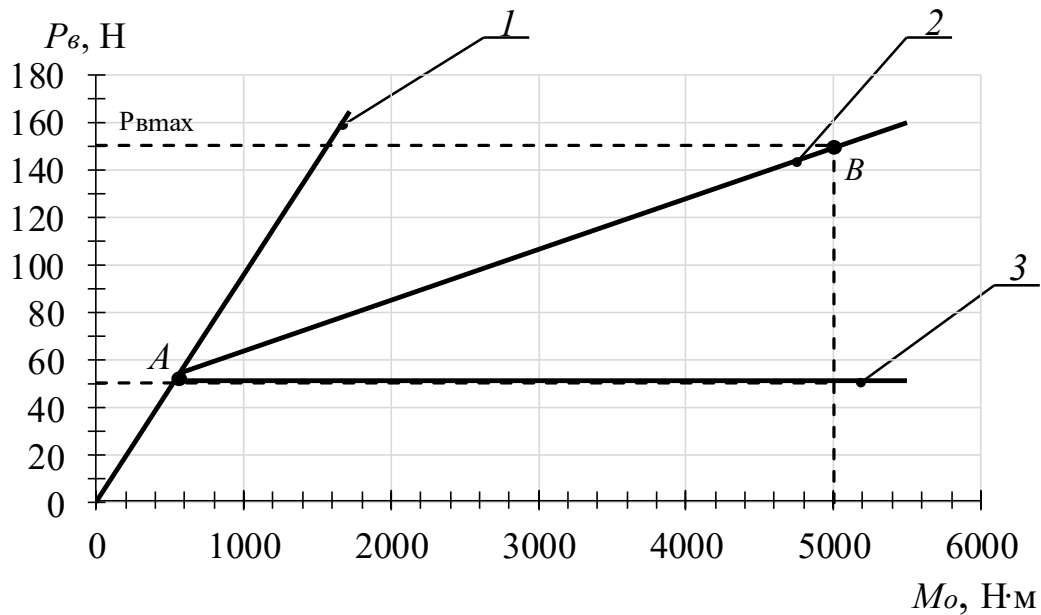


Рисунок 1.6 – Залежності зусилля водія  $P_e$  від моменту опору  $M_o$  для різних підсилювачів рульового керування тролейбуса:

- 1 –  $P_e = f(M_o)$  – без підсилювача; 2 – з підсилювачем (оптимально підібрані параметри); 3 – з підсилювачем надмірної потужності.

При недостатній потужності характеристика буде проходити вище характеристики 2. В цьому випадку водій повинен прикладати до рульового колеса надмірне зусилля для повороту, що збільшує втому водія і погіршує керування тролейбусом [22].

На даний час на більшості сучасних тролейбусів застосовується гідропідсилювач, який конструктивно об'єднаний в одному агрегаті з рульовим приводом. Розміщення гідростанції на кожній моделі тролейбуса може відрізнятися, але обов'язковою умовою є вільний доступ до оливного бачка, насосу та двигуну насоса [22].

Для безпечної роботи тролейбуса на лінії необхідною умовою є забезпечення роботи гідропідсилювача при раптовому зникненні напруги в контактній мережі, щоб водій встиг зупинити тролейбус та припаркуватися. Для цього конструкцією тролейбуса передбачено аварійне живлення двигуна гідропідсилювача від акумуляторних батарей. На деяких моделях тролейбусів двигуни гідростанції мають маховики, які крутять двигун після його

виключення, і, відповідно, гідронасос, що створює необхідний тиск для роботи гідропідсилювача [17, 22].

Наприклад, на деяких тролейбусах українського виробництва застосовують кулько-гвинтовий гідропідсилювач типу ШВГУ-720 (НВО «Радій», Кіровоград). Гідростанція, яка призначена для приведення в дію гідропідсилювача керма складається з гідронасоса, приводного двигуна, оливного бачка з фільтром і трубопроводів низького і високого тиску.

### 1.3.1 Системи рульового керування, які застосовуються на тролейбусах.

Розглянемо конструкцію рульового керування на прикладі тролейбусу ЛАЗ-Е183 та його модифікацій. Система рульового керування тролейбуса ЛАЗ-Е183D1 (рис. 1.7) складається з рульового колеса, рульової колонки, карданної передачі, кутового редуктора, рульового механізму з вмонтованим гідропідсилювачем, поздовжньої та поперечної рульових тяг, насоса гідропідсилювача рульового приводу, бачка насоса гідропідсилювача, трубопроводів і шлангів високого та низького тиску [19, 32, 33].

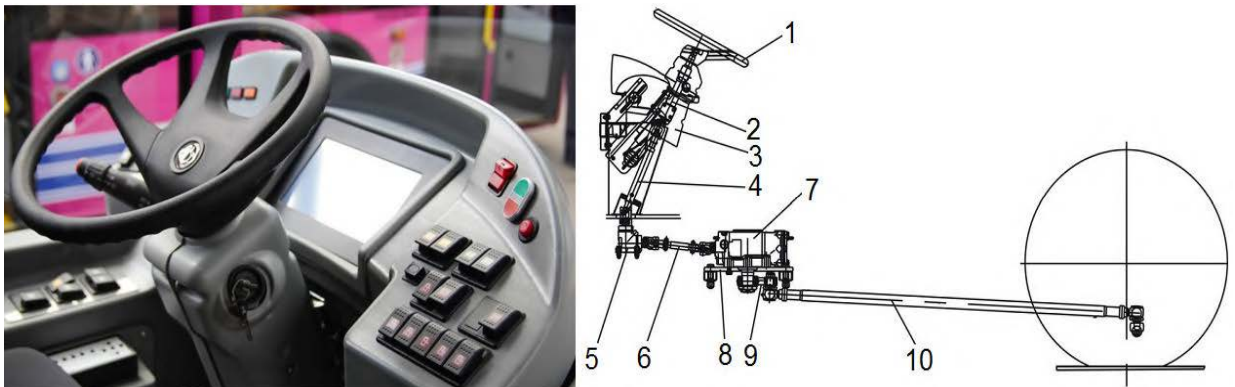


Рисунок 1.7 – Загальний вид панелі рульового керування тролейбуса ЛАЗ-Е183D1 та основні елементи системи: 1 –рульове колесо; 2 – рульова колонка; 3 – кожух рульової колонки; 4 – карданний вал рульової колонки; 5 – кутовий редуктор; 6 – карданний вал рульового механізму; 7 – рульовий механізм з вмонтованим гідропідсилювачем; 8 – кронштейн; 9 – сошка; 10 – поздовжня тяга.

Електродвигун забезпечує обертання насоса гідропідсилювача рульового приводу. Олива з бачка насоса гідропідсилювача всмоктується в порожнину насоса і далі під тиском надходить по трубопроводах високого тиску до рульового приводу з гідропідсилювачем. Під час обертання рульового колеса вступає в дію сервосистема, яка забезпечує зменшення зусилля на рульовому колесі, що необхідне для повороту керованих коліс передньої осі. Повертаючи рульове колесо з незначним зусиллям, олива з великим тиском діє на поворотні кулаки та рульові тяги. Надмірна кількість оливи з порожнини рульового механізму повертається по трубопроводу низького тиску у бачок насоса гідропідсилювача. Кругова циркуляція оливи забезпечує безперебійну роботу управління керованими колесами. У цьому разі значно зменшується зусилля, що необхідне для обертання рульового колеса [19, 32, 33].

Гідросистема гідропідсилювача тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 зображена на рисунку 1.8 [19, 32].

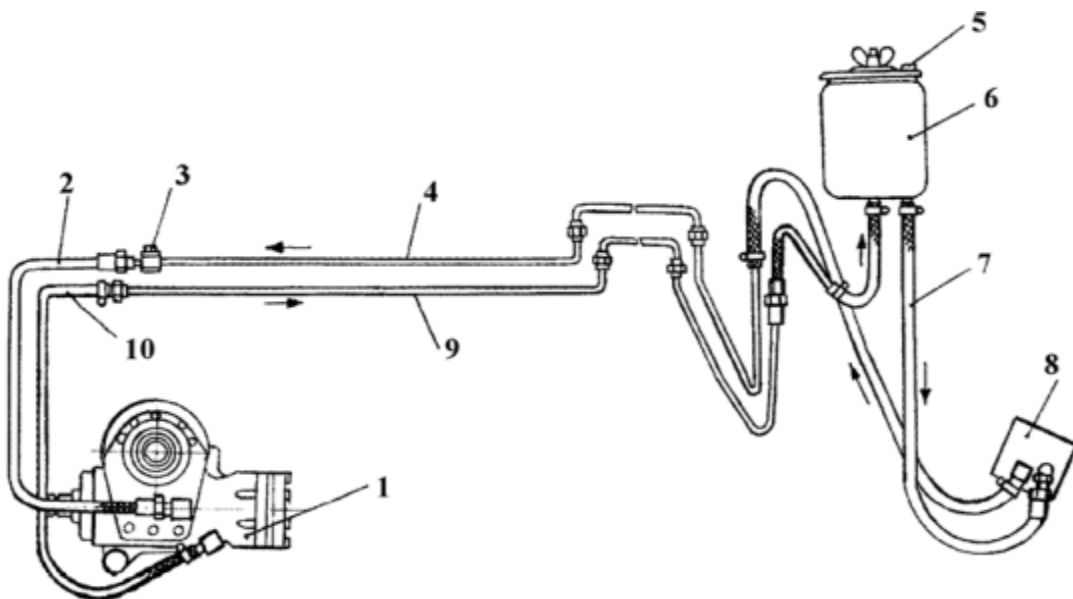


Рисунок 1.8 – Схема циркуляції рідини у системі гідропідсилювача руля тролейбусу ЛАЗ-Е183D1: 1 – рульовий механізм із гідропідсилювачем; 2 – шланг високого тиску; 3 – пробка контрольна для установки манометра; 4 – трубопровід високого тиску; 5 – щуп; 6 – бачок насоса гідропідсилювача; 7 – шланг; 8 – насос гідропідсилювача; 9 – трубопровід низького тиску; 10 – шланг низького тиску

Механічна частина рульового механізму виконана за типом: гвинт-гайка- поршень зубчатий сектор. Гідравлічна частина – гайка-поршень.

Оливний насос створює у гідросистемі тиск оливи, яка поступає під гайку-поршень і у такий спосіб прискорює його рух. Насос гідропідсилювача рульового приводу входить до складу гідроагрегата (рис. 1.9) і приводиться в дію від електродвигуна постійного струму з напругою живлення 24 В [19, 32].

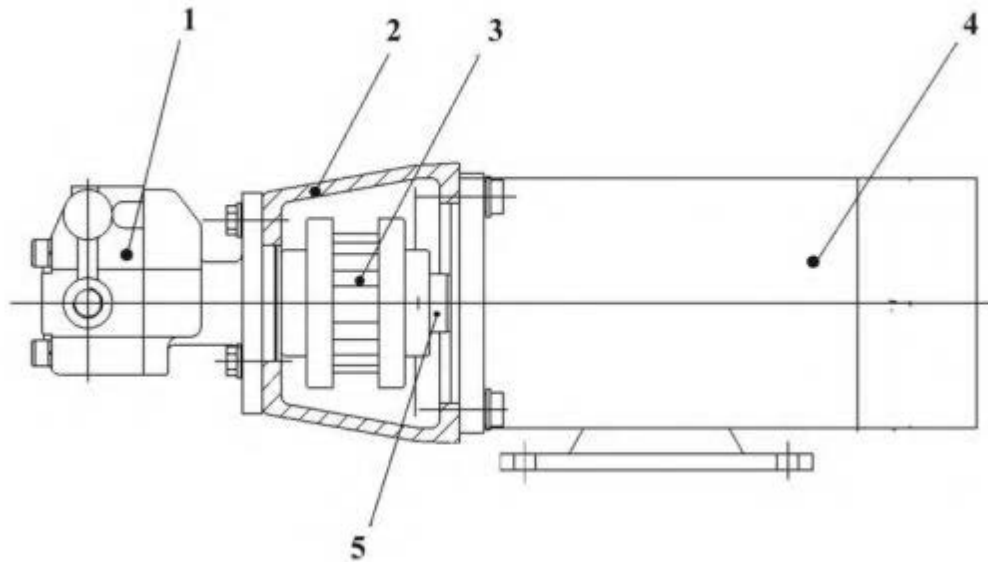


Рисунок 1.9 – Гідроагрегат: 1 – насос гідропідсилювача; 2 – кронштейн кріплення насоса; 3 – муфта з'єднувальна; 4 – електродвигун; 5 – стопорне кільце

### 1.3.2 Перспективні електромеханічні підсилювачі рульового приводу.

Сучасні конструкції системи рульового керування у сфері транспортного машинобудування створюються з урахуванням специфіки роботи підсилювачів рульового приводу. На цей час існує велика кількість варіантів конструкції рульового керування з електромеханічним підсилювачем.

В одному з варіантів перспективного рульовому керування з електромеханічним підсилювачем рульового приводу (див. рис. 1.10), система оснащується формувачем керуючого впливу і групою датчиків параметрів руху транспортного засобу [41].



Оснащення групою датчиків параметрів руху транспортного засобу дає можливість збирати інформацію з відповідних пристроїв і передавати її на формувач керуючого впливу. На рисунку 1.10 представлена схема багатоканального рульового керування з електромеханічним підсилювачем рульового приводу з тактильними властивостями. Пристрій складається з безконтактного багатополісного високомоментного двигуна 1, який жорстко пов'язаний з рульовим валом 6 та електронним контролером 3, формувач керуючого впливу 4 поєднаний з групою датчиків 5, датчика положення ротора двигуна 7 і датчиком обертового моменту 2, який пов'язаний з безконтактним багатополісним високомоментним двигуном 1 [41].

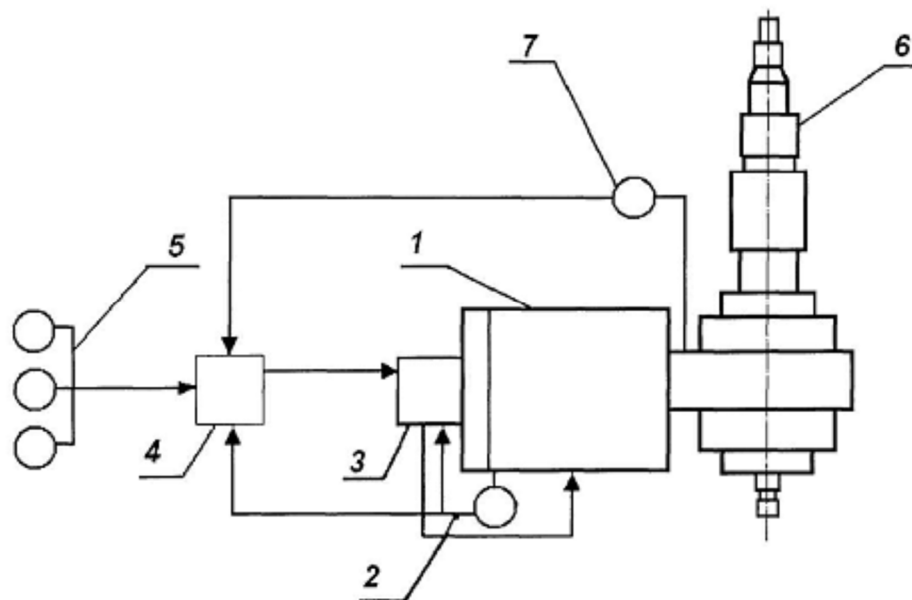


Рисунок 1.10 – Схема багатоканального рульового керування з електромеханічним підсилювачем руля з тактильними властивостями [41]:

1 – високомоментний двигун; 2 – датчик моменту; 3 – електронний контролер; 4 – формувач керуючого впливу; 5 – група датчиків; 6 – рульовий вал; 7 – датчик положення ротора.

Під час руху транспортного засобу керуючі впливи здійснює безконтактний багатополісний високомоментний двигун 1 за допомогою датчика моменту 2 та електронного контролера 3. Формувач керуючого впливу 4 в залежності від інтенсивності сигналів, які надходять з групи

датчиків 5, а також датчика положення ротора 7 формує відповідний тактильний момент опору на рульовому валу 6. Це дає змогу відтворити тактильний канал зв'язку між водієм та дорогою [41].

Недоліком багатоканального рульового керування з електромеханічним підсилювачем руля з тактильними властивостями (рис. 1.10) є те, що силова передача обмежена низьким моментом, який передається на керовані колеса.

### 1.3.3 Сучасні електромеханічні підсилювачі рульового приводу.

Яскравим прикладом серійного застосування рульового керування з електромеханічним підсилювачем на транспорті є ZF Servolectric (див. рис. 1.11) [45]. На сьогоднішній день існують кілька варіантів конструктивного виконання вузлів Servolectric, які використовують в залежності від типу автомобіля. На компактних легкових автомобілях підсилювачі встановлюються на рульову колонку, на автомобілях середнього класу допоміжне зусилля передається на рейку за допомогою додаткової шестерні, а на позашляховиках і легких комерційних машинах застосовується так звана «паралельно-осьова» конструкція [45].

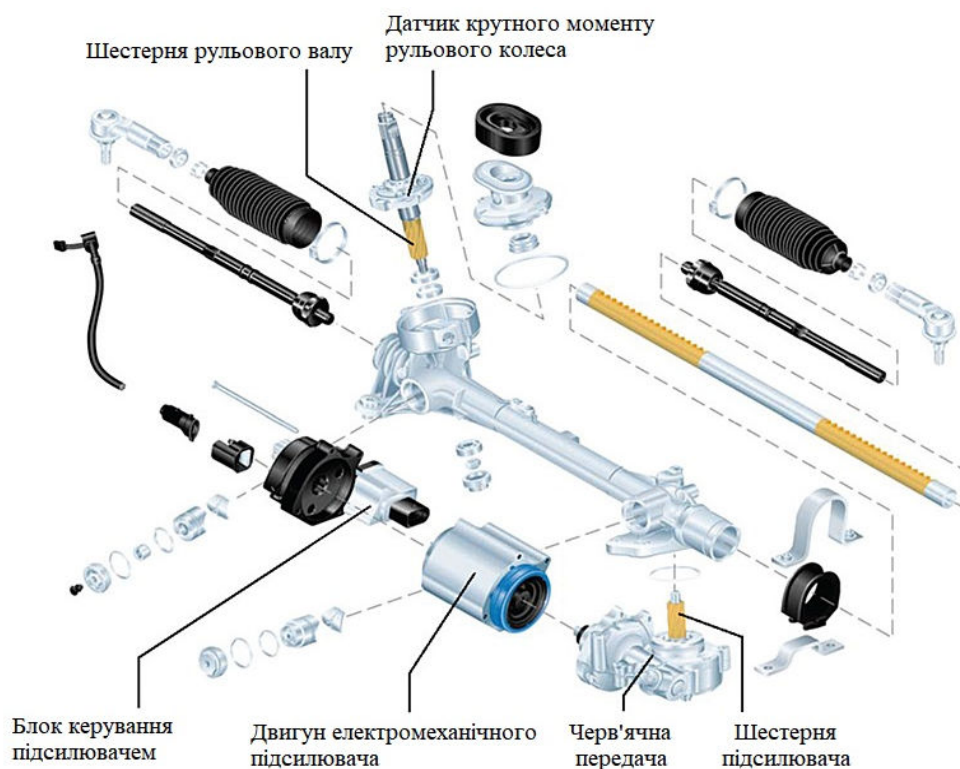


Рисунок 1.11 – Структура електромеханічного підсилювача рульового керування ZF Servolectric

На легких автомобілях велике зусилля від електричного підсилювача керма не потрібно, тому і електродвигун, і сервопривод виходять настільки компактними, що легко вміщаються під кермом в салоні автомобіля. Там же розміщуються і датчики. Таким чином, вся конструкція надійно захищена від пилу, бруду і високих температур підкапотного простору, що сприятливо позначається на надійності. На автомобілях середнього класу встановлюється електричний підсилювач керма з двома шестернями. Через одну шестерню на рейку передається зусилля від керма, а через іншу – допоміжне зусилля від електромотора. Для перетворення обертального руху електродвигуна в лінійне переміщення рульової рейки використовується зубчатопасовий привід і механізм «гвинт-гайка на циркулюючих кульках» [45].

Незважаючи на переваги, більшість автомобілів оснащується гідравлічною рейкою. На цей час забезпечити використання електромеханічної рейки нездатна існуюча система електропостачання. Споживання струму з електромеханічною рейкою може досягати до 80 А [45].

#### **1.4 Недоліки в конструкції рульового керування сучасних транспортних засобів.**

Конструкції рульового керування будь-якого транспортного засобу залежать від функціональних особливостей, комплектації, та приводної системи підсилювача [37–45].

Наприклад, до основних недоліків конструкцій рульового керування тролейбусів з гідропідсилювачем відносяться:

- неможливість тримати рульове колесо в крайньому положенні великий проміжок часу, інакше відбудеться перегрів оливи в системі, що призводить до поломки;
- складність обслуговування: заміна робочої рідини, слідкування за рівнем оливи в системі, перевірка стану приводів, контроль цілісності шлангів і насоса підсилювача;

– робота насоса гідропідсилювача безпосередньо пов'язана з постійним нагнітанням тиску робочої рідини, тому насос постійно відбирає частину потужності, яка при прямолінійному русі, коли гідропідсилювач не задіяний, витрачається даремно;

– складнощі у налаштуванні режимів роботи рульового приводу в залежності від умов руху.

До основних недоліків систем з електромеханічними підсилювачами рульового керування можна віднести:

- високі вимоги до потужності електричної мережі живлення;
- відносно малий обертальний момент на валу електричного підсилювача;
- великі масо-габаритні параметри для ТЗ з великим навантаженням на керовану вісь (вантажні автомобілі, автобуси, електробуси, тролейбуси);
- складність системи керування електричним двигуном підсилювача рульового приводу;
- наявність додаткових передавальних механізмів між електричним двигуном та рульовим механізмом.

### **1.5 Перспективне рішення удосконалення системи рульового керування тролейбусу.**

Тролейбус має специфічну конструкцію рульового керування. Як показав аналіз підсилювачів рульового приводу, електричні підсилювачі мають низькі показники обертального моменту та швидкості спрацьовування системи на вантажних та пасажирських транспортних засобах (тролейбус, автобус), що призводить або до збільшення зусилля повороту керма та незручностей у керуванні транспортним засобом, або до збільшення масогабаритних та енергетичних показників підсилювача [1].

В рамках даного дослідження презентується науково-технічне рішення, яке сприяє підвищенню ефективності і спрощенню конструкції рульового

керування тролейбуса за рахунок використання принципів рульового керування автомобілів сучасних конструкцій з електричними підсилювачами рульового приводу.

Враховуючи масогабаритні показники рухомого складу, а також його конструкційні особливості, основою електроприводу підсилювача рульового керування тролейбуса має бути електричний двигун, який поєднує в собі високий обертальний момент з відносно незначними масогабаритними параметрами.

Характерною особливістю тролейбуса є наявність високовольтної тягової контактної мережі напругою 550 В (600 В) постійного струму [47]. При цьому у якості тягового електроприводу дедалі частіше застосовується синхронні або асинхронні двигуни з напругою живлення 380 В змінного струму [48]. Слід також зазначити, що більшість сучасних тролейбусів оснащенні системами автономного ходу, де у якості додаткового джерела живлення, подібно до електробусів, застосовують тягові високовольтні акумулятори з напругою 400 – 600 В [48–51]. Наявність у тролейбуса високовольтного тягового джерела живлення значно розширює варіанти, щодо вибору електроприводу для підсилювача рульового приводу системи рульового керування.

Промисловий розвиток, починаючи з середини 80-х років 20 століття, отримують електроприводи з мікропроцесорними системами керування на надійній елементній базі [52]. Основою таких приводів є вентильні та асинхронні двигуни, а також синхронні двигуни з постійними магнітами, які здатні працювати на низьких частотах обертання з високими питомими енергетичними і моментними показниками. Сучасні системи високомоментного безредукторного електроприводу дозволяють отримати стабільну роботу на частотах обертання вихідного валу електричного двигуна від 10 об/хв [52].

На сьогоднішній день сучасні системи високомоментного електроприводу представлені великою кількістю виробників. Лідерами у галузі є наступні компанії: Baumüller, Zollern, Siemens, Bosh.

Компанія Baumüller має лінійку високомоментних двигунів DST2-560 [53]. Двигуни даної серії є багатополюсними синхронними електричними машинами з постійними магнітами. Усі двигуни даної серії працюють від мережі змінного струму напругою 400 В. Діапазон обертальних моментів серії складає від 11 кН·м до 28 кН·м. Діаметр електричної машини даної серії складає більше 1 метра. Висока щільність обертального моменту у діапазонах низьких та середніх частот обертання представленої серії робить її особливо підходящою до застосування у системах з прямим приводом. Даний тип двигунів має водяне охолодження. Номінальна частота обертання складає 100 об/хв.

Компанія Zollern представлена лінійкою високомоментних двигунів серії ТМ [54]. Данна серії двигунів є багатополюсними синхронними електричними машинами. Серія двигунів ТМ має широку номенклатуру типорозмірів із зовнішнім діаметром статора від 0,09 м до 2,2 м та номінальним моментом в діапазоні від 0,185 кН·м до 30 кН·м. Наявність водяного охолодження сприяє форсуванню даного типу двигунів, що може підвищити обертальний момент до 2 разів. Напруга живлення серії двигунів ТМ складає 400 В змінного струму. Діапазон частот обертання в залежності від конкретного виконання двигуна складає від 25 об/хв до 800 об/хв.

Серія високомоментних багатополюсних синхронних двигунів SIMOTICS T-1FW6 компанії Siemens [55] має широкий діапазон номінальних частот обертання вихідного валу двигуна від 270 об/хв до 1200 об/хв. При цьому двигуни даної серії спроможні реалізовувати моменти до 6 кН·м. Напруга живлення двигунів T-1FW6 складає 400 В змінного струму. У конструкції двигуна передбачена система водяного охолодження. Серія представлена дев'ятьма типорозмірами із зовнішнім діаметром статора від 0,159 м до 0,73 м.

Компанія Bosh має серію високомоментних багатополюсних двигунів з постійними магнітами Rexroth IndraDyn T [56]. Як і попередні види двигунів має у своїй конструкції систему водяного охолодження. Працює від мережі трифазної напруги 400 В змінного струму. Частоти обертання представлені широким діапазоном від 25 об/хв до 4000 об/хв. Обертальний момент серії варіюється в діапазоні від 9 Н·м до 6 кН·м. При цьому зовнішній діаметр електричної машини, в залежності від виконання, може становити від 0,15 м до 0,6 м.

Характерною особливістю всіх представлених вище двигунів є наявність водяної системи охолодження та значних габаритних розмірів у представників серій, які спроможні розвивати значні обертальні моменти.

Оскільки система рульового приводу тролейбуса має конструкцію (див. п. 1.3), що характеризується частотою обертання вихідного валу двигуна менше 10 об/хв, при цьому у процесі роботи сошка рульового приводу рухається лише у діапазоні  $\pm 45^\circ$ , все це змушує шукати альтернативні варіанти електроприводів. Наприклад редукторний або сервопривод.

Сучасні дослідження електроприводу, де застосовуються виключно редукторні електроприводи, а саме однооборотні електроприводи з наднизькою частотою обертання (0,1–10 об/хв.) та високим моментом, а також тихохідні багатооборотні електроприводи рідкісного використання (до 2 тисяч циклів за час експлуатації, до 100 пусків на рік) проводяться в області двигунів з ротором що котиться [52, 57–59].

Двигун з ротором, що котиться – це електромеханічний перетворювач, частина якого, що обертається – ротор має механічний контакт з нерухомою частиною – статором, що здійснює під дією модульованого обертового магнітного поля і сили тертя ексцентричний або прецесійний рух щодо центру маси нерухомої частини [52].

За рядом джерел створення ДРК відносять до винаходу в 1845 Чарльзом Вінстоном двигуна поступального руху [52]. У 1897 році у США видається патент № 586823 на ім'я Patten, потім там же видаються патенти № 2.275.827,

2.378.668, 2.378.669 та в 1923 році в Німеччині на ім'я Ferreday видається патент № 144. У цих патентах пропонуються двигуни, у яких використовується принцип кочення ротора. Живлення двигунів здійснюється від мережі постійного струму через різні пристрої, що комутують полюси електричної машини. Слід зазначити останній з вище наведених патент, в якому приведено ряд кінематичних схем ДРК, які в тій чи іншій модифікації є у більшості подальших конструкцій [52].

Перші працездатні електродвигуни з ротором що котиться і хвильовим ротором змінного струму були запропоновані А.І Москвитіним в 1944, а його публікація в 1947 стала відправною точкою теоретичних і практичних розробок ряду колективів в СРСР і в країнах Європи [52].

Перші відомості про працездатні ДРК у Франції з'являються у 1959 року. К. Розен та Г. Щербачов отримали патенти на синхронний ДКР типу Steromoteur та з 1962 року французька фірма Rochar Electronique за цими патентами починає серійний випуск двигунів Р-5, Р-52 та РР-6А [60]. Вони мали гладкі та зубчасті поверхні обкатування та застосовувалися для різних типів автоматизованого безредукторного електроприводу з фіксованими частотами обертання в діапазоні 2–200 об/хв для різних режимів роботи (S1, S3, S4, S8). Ліцензії на виробництво цих двигунів набувають Англія, США, Японія, Канада та низка інших країн. ДКР знаходить застосування в автоматизованих лініях харчової та целюлозопаперової промисловості, вентилях та засувках, побутовій техніці тощо. У приведених країнах ДКР випускався великосерійними партіями по 10–15 тисяч штук [52].

Дослідженнями та виробництвом ДРК сьогодні займаються у Японії [61,62], Німеччині [63–65], США [66] (лінійні, сферичні ДКР, компресори та інших). Теоретичні та дослідно-конструкторські дослідження проводяться в Україні у НТУ «ХПІ» на кафедрі електричних машин [52].

Можливість практичного використання ДРК отримав за рахунок своїх властивостей [52 – 66]:



1) Високий питомий крутний момент  $0,5 - 2 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$  при низькій частоті обертання  $0,1 - 200 \text{ об}/\text{хв}$ ;

2) Низькі пускові та струми короткого замикання, на рівні  $1,1-3$  від номінального значення струму обмотки статора, здатність тривалий час працювати «на упор»;

3) Висока швидкодія (часу розгону та зупинки  $0,01-0,05 \text{ с}$ , відсутність самоходу, «вибігу»), здатність працювати в режимі електромагнітного гальма.

З урахуванням недоліків існуючих систем рульового керування, вимог щодо рульового керування тролейбусів та сучасних автомобільних систем пропонується інноваційне рішення підвищення ефективності роботи рульових систем тролейбусів за рахунок використання принципу дії електропідсилювача на базі електричного двигуна з ротором що котиться.

Таке рішення має на меті досягти ряд переваг, а саме:

- простоту конструкції: електропідсилювач не має рідини, шлангів, насоса, та інших елементів, які потребують періодичного огляду і обслуговування.

- електропідсилювач має більш компактну конструкцію, ніж гідропідсилювач, не займає багато місця у підкузовному просторі;

- електропідсилювач економить енерговитрати, тому що починає працювати тільки при необхідності створення додаткового зусилля при повороті керма, на відміну від гідропідсилювача, гідронасос якого постійно споживає енергію;

- через електронний блок керування можна налаштувати режими роботи електропідсилювача в залежності від умов, в яких експлуатується транспортний засіб;

- рульове колесо з електропідсилювачем можна тривалий час тримати в крайньому положенні;

- застосування електродвигуна з ротором, що котиться дає можливість при поворотах керма реалізовувати великі крутні моменти і відповідно достатні зусилля для повороту керованих коліс.

## Висновки за розділом 1

1. Розглянувши структуру системи рульового керування з розподілом елементів рульового керування за функціональним призначенням визначено, що на сучасних транспортних засобах для зменшення зусиль, необхідних для повороту рульового колеса, підвищення комфорту та безпеки руху застосовуються підсилювачі рульового приводу. Виділяють три основні типи підсилювачів: пневматичні, гідравлічні, електричні.

2. Проведений аналіз підсилювачів рульового керування показав, що на більшості сучасних транспортних засобів застосовується підсилювачі рульового приводу гідравлічного типу. Враховуючи конструктивні особливості гідропідсилювачів визначено, що до основних недоліків, які впливають на надійність та ефективність їх роботи, відноситься: наявність шлангів високого тиску та робочої рідини, яка перекачується під тиском у системі; постійна робота насоса гідропідсилювача, навіть тоді коли створення додаткового зусилля для повороту керованих коліс не потрібне.

3. Зазначено, що для покращення ефективності та експлуатаційних характеристик системи рульового керування набуває популярності застосування електромеханічних підсилювачів, які представлені різноманітними типами конструктивних виконань. Визначено, що сфера застосування електромеханічних підсилювачів рульового приводу обмежена транспортними засобами, маса яких не перевищує 10 тон. Це насамперед пов'язано зі збільшенням масогабаритних параметрів електроприводної системи для забезпечення необхідного зусилля при повороті керованих коліс, а також значне споживання електричної енергії, що збільшує навантаження на бортову електричну мережу транспортного засобу.

4. У роботі вперше запропоновано рішення підвищення енергоефективності та експлуатаційних характеристик системи рульового керування тролейбусу за рахунок використання електричного двигуна з ротором що котиться у конструкції підсилювача рульового приводу. Таке

рішення дозволяє створювати значний крутний момент при малих частотах обертання та забезпечує зниження витрат енергії за рахунок роботи такого підсилювача тільки у моменти, коли необхідно створювати додаткове зусилля для повороту керованих коліс. Обґрунтовано доцільність використання двигуна з ротором що котиться.

В результаті проведених досліджень, **поставлена мета** дисертаційної роботи: дослідження та удосконалення рульового керування тролейбусу для підвищення його ефективності та експлуатаційних характеристик за рахунок використання електричного підсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні **задачі**:

- провести аналіз систем рульового керування тролейбусів, визначити їхні проблеми і запропонувати шляхи їх вирішення;
- обґрунтувати методи та засоби дослідження системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться з урахуванням особливостей його роботи та взаємодії з конструктивними елементами рульового приводу;
- визначити характеристики предмету дослідження;
- провести розрахунок двигуна з ротором що котиться з необхідними параметрами;
- розробити математичну та імітаційну моделі рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться;
- провести дослідження роботи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться за різних умов та режимів руху;

– визначити ефективність роботи системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться і розробити рекомендації щодо його застосування.

Ряд результатів дослідження представлених у даному розділі було опубліковано у наукових працях [1], [3]

## РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСУ

Інтерес щодо використання систем електроприводу стрімко зростає у всіх галузях науки та техніки завдяки впровадженню та розвитку інноваційних наукових концепцій.

Сучасні дослідження електромеханічних систем, при застосуванні нових матеріалів та неординарних конструкцій, спонукають до науково-технічних рішень, метою яких є оптимізація та адаптація вузлів і механізмів систем до конкретних умов застосування.

Застосування коректних методів для досліджень дозволяють своєчасно, зручно та з малими витратами розробляти новітні науково-технічні рішення, накопичувати та оптимізувати отримані результати. Це сприяє швидкому реагуванню на постійно зростаючі вимоги науково-технічного прогресу.

На даний момент найбільш популярним є підхід щодо дослідження та розробки систем електроприводу на основі імітаційного моделювання. Це дозволяє проводити цільові експерименти, які у реальних умовах можливо виконувати з обмеженими можливостями або ж й зовсім неможливо. Досить часто дослідження, які пов'язані з натурними експериментами, збільшують фінансові витрати, терміни розробки, а інколи не дозволяють провести всебічний аналіз процесів системи, що досліджується. Сучасні комп'ютерні технології у цьому контексті стають все більш необхідними.

Моделювання дозволяє оперативно виконувати оцінку поведінки системи. Тому створення коректної моделі є важливим критерієм, котрий служить основою для подальших досліджень.

Вже сьогодні існують середовища для моделювання механічних, магнітних, електричних, теплових систем, які базуються на фізичних законах адаптованих до конкретної області використання [67]. Поява можливості використання доступних середовищ моделювання дозволяє отримати

максимально реалістичну модель системи, що досліджується та розширити область її застосування [68–74].

У даному розділі розглядаються основні елементи системи рульового керування тролейбусу необхідні для її дослідження. Основними питаннями є визначення характеристик предмету дослідження, визначення методів розрахунок магнітного поля ДРК з використанням сучасних методів моделювання, розрахунок ДРК з параметрами, які необхідні для забезпечення роботи підсилювача рульового приводу системи рульового керування тролейбусу, особливості конструкції підсилювача РП на базі ДРК у системі рульового керування тролейбусу.

## **2.1 Визначення характеристик предмету дослідження**

### **2.1.1 Визначення параметрів рухомого складу.**

У роботі розглядається можливість удосконалення системи рульового керування тролейбусу шляхом використання нестандартних систем електроприводу, а саме використання у якості підсилювача рульового приводу двигуна з ротором що котиться.

Для коректного вибору параметрів електропідсилювача рульового приводу у подальших дослідженнях, необхідно визначити основні характеристики предмету дослідження. У роботі пропонується розглядати систему рульового керування тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 та його модифікацій, яка відрізняється від базової тим, що у конструкції підсилювача рульового приводу пропонується використовувати тихохідний високомоментний електродвигун з ротором що котиться.

Основні технічні характеристики тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 визначені у [19, 32] та мають значення зведені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики тролейбусу ЛАЗ-Е183D1

Параметр	Значення
Максимальне технічно-допустиме навантаження, яке припадає на передню вісь, враховуючи масу пасажирів, кг	6500
Максимальний кут повороту керованого колеса, град	40
Шини	радіальні
Розміри шини	275/70 R22,5
Зовнішній діаметр колеса, м	0,957
Колісна база тролейбусу, м	5,850
Передаточне відношення редуктору рульового приводу	23,2

Передня керована вісь тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 (рис. 2.1) представляє собою порталну балку двотаврового перерізу типу ZF RL85A в зборі з шарнірами рульової тяги і дисковими гальмівними механізмами [32, 33].

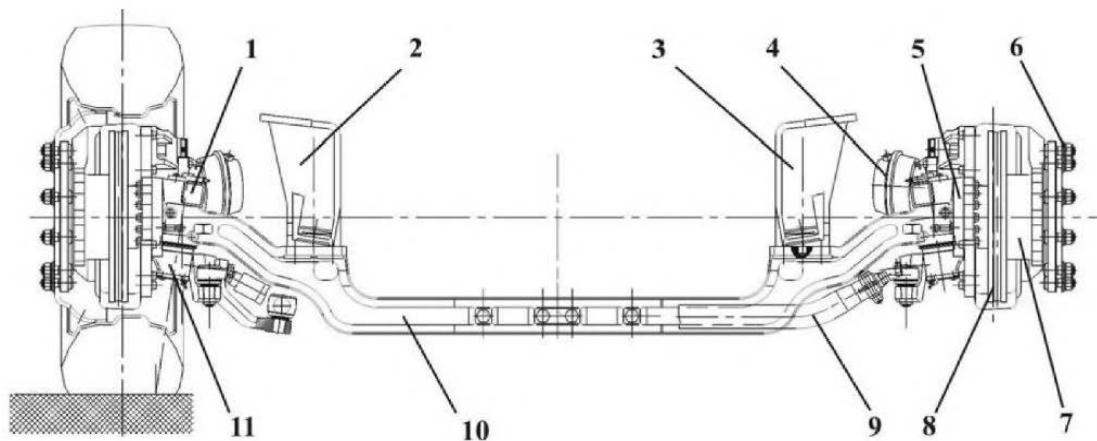


Рисунок 2.1 – Передня вісь тролейбусу ЛАЗ-Е183D1:

- 1 – підшипник шворня верхній; 2, 3 – кронштейн пневмобалону;  
 4 – гальмівна камера; 5 – поворотна цапфа; 6 – болти та гайки кріплення коліс; 7 – маточина; 8 – гальмівний диск; 9 – поперечна рульова тяга;  
 10 – балка передньої осі; 11 – підшипник шворня нижній.

Керована вісь має технічні характеристики зведені до таблиці 2.2 [19, 32]. Дані параметри необхідні для визначення положення центру

контактного відбитку шини під час моделювання системи рульового керування тролейбусу.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики підвіски керованих коліс тролейбусу

Параметр	Значення
Розвал коліс, град	1
Поздовжній нахил шворня, град	2°30′
Поперечний нахил шворня, град	4
Довжина цапфи, м	0,125

### 2.1.2 Визначення моменту опору повороту керованих коліс.

Визначення необхідних електромеханічних характеристик електричного підсилювача рульового приводу на базі високомоментного ДРК для повороту керованих коліс, із відповідними параметрами швидкодії та ефективності, виконується відповідно до максимально можливого моменту опору повороту керованих коліс [75–87].

На основі даних [75, 76] максимально можливий момент опору при повороті керованих коліс створюється під час їх повороту на місці.

Попередня оцінка максимального моменту опору при повороті керованих коліс проведена на базі лабораторного стенду кафедри електричного транспорту – «Стенд для дослідження систему рульового керування тролейбусу з гідропідсилювачем» Харківського національного університету імені О. М. Бекетова. Стенд представлений на рисунку 2.2.





Рисунок 2.2 – Стенд для дослідження системи рульового керування тролейбусу з гідропідсилювачем

У якості пристрою для вимірювання сили опору при повороті керованих коліс на стенді застосовувався тензOMETричний S-подібний датчик стиснення/розтягування KELI DEF 750 (див. рис. 2.3).

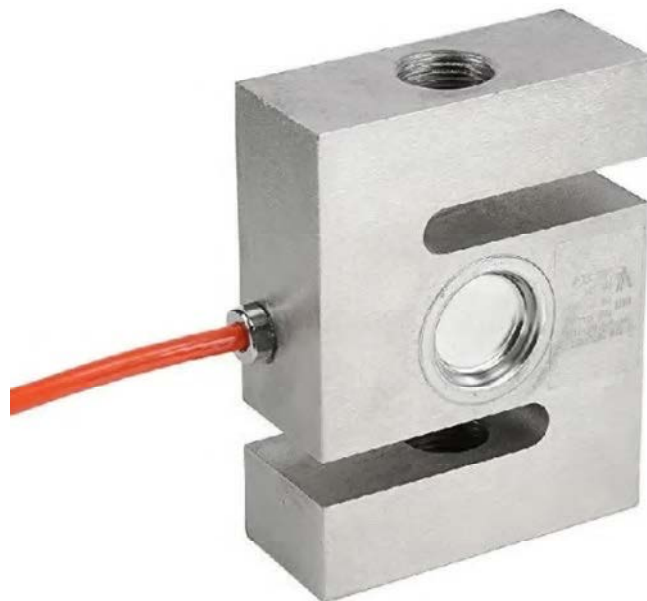


Рисунок 2.3 – S-подібний тензOMETричний датчик

Основні характеристики тензOMETричного датчику KELI DEF 750 представлені у таблиці 2.3.

Експеримент проводився з дискретністю повороту керованих коліс в один градус. При цьому враховувалось, що керовані колеса тролейбусу

повертаються на різні кути. Зовнішнє колесо відстає від внутрішнього з кожним кроком на  $0,15^\circ$ . Кількість циклів експерименту складала не менше п'яти ітерацій, після яких було проведено апроксимацію отриманих результатів. Площа контактного відбитку шини приведено до рівновеликого прямокутника зі сторонами  $a_{к.в.} = 0,286$  м,  $b_{к.в.} = 0,263$  м. Коефіцієнт зчеплення з покриттям  $\mu_z = 0,85$ .

Таблиця 2.3 – Характеристики тензOMETричного датчику KELI DEF 750

Параметр	Значення
Номінальне навантаження, кг	750
Клас точності	C3 (0,05%)
Похибка вимірювання, від номінального навантаження	$\pm 0,03\%$
Безпечна межа навантаження, від номінального навантаження	150%
Напруга живлення (DC), В	12
Вхідний опір, Ом	$400 \pm 20$
Вихідний опір, Ом	$352 \pm 3$
Нелінійність вимірювання, від номінального навантаження	$\pm 0,05\%$
Клас захисту	IP65

Отримані результуючі дані моменту опору повороту керованих коліс зведено до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Моменту опору повороту керованих коліс.

$\Theta_{вн}$	$\Theta_{зв}$	$M_{оп.вн}$	$M_{оп.зв}$	$M_{оп}$	$\Theta_{вн}$	$\Theta_{зв}$	$M_{оп.вн}$	$M_{оп.зв}$	$M_{оп}$
1	0,85	286	243	529	21	17,85	2678	2678	5356
2	1,7	572	486	1058	22	18,7	2678	2678	5356
3	2,55	858	729	1588	23	19,55	2678	2678	5356
4	3,4	1144	973	2117	24	20,4	2678	2678	5356
5	4,25	1430	1216	2646	25	21,25	2678	2678	5356
6	5,1	1723	1459	3182	26	22,1	2678	2678	5356
7	5,95	1976	1709	3685	27	22,95	2678	2678	5356
8	6,8	2191	1929	4119	28	23,8	2678	2678	5356
9	7,65	2366	2120	4486	29	24,65	2678	2678	5356
10	8,5	2502	2283	4786	30	25,5	2678	2678	5356
11	9,35	2600	2418	5018	31	26,35	2678	2678	5356
12	10,2	2658	2525	5183	32	27,2	2678	2678	5356
13	11,05	2678	2604	5282	33	28,05	2678	2678	5356
14	11,9	2678	2654	5332	34	28,9	2678	2678	5356
15	12,75	2678	2677	5355	35	29,75	2678	2678	5356
16	13,6	2678	2678	5356	36	30,6	2678	2678	5356
17	14,45	2678	2678	5356	37	31,45	2678	2678	5356
18	15,3	2678	2678	5356	38	32,3	2678	2678	5356
19	16,15	2678	2678	5356	39	33,15	2678	2678	5356
20	17	2678	2678	5356	40	34	2678	2678	5356

На основі даних (див. табл. 2.4) побудовано характеристику залежності моменту опору повороту керованих коліс (див. рис. 2.4). Загальний момент опору повороту приведено до кута повороту внутрішнього колеса керованих коліс.

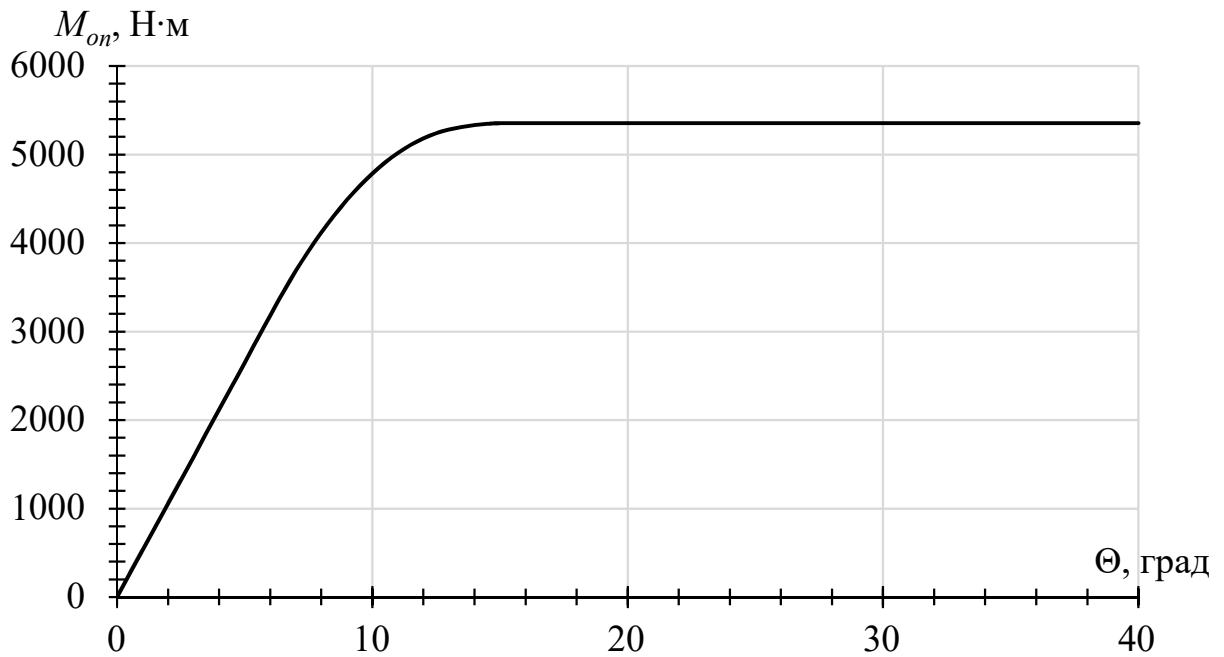


Рисунок 2.4 – Залежність моменту опору повороту керованих коліс від кута їх повороту

Аналіз отриманої залежності (див. рис. 2.4) показав, що максимальний момент опору повороту керованих коліс складає  $M_{on} = 5356$  Н·м. Враховуючи вимоги до рульового керування [17] у його конструкції має бути передбачена можливість обертання рульового колеса транспортного засобу у випадках коли підсилювач рульового приводу несправний. Це накладає певні вимоги до конструкції рульового приводу, а саме наявність передавальних механізмів (редуктор рульового приводу), які підвищують момент, що створює водій транспортного засобу. Відповідно до методів розрахунку підсилювачів рульового приводу [75–87], беручи до уваги вимоги [17], обертальний момент на валу високомоментного ДРК можна визначити за виразом  $M_{ДРК} = M_{on} - M_{вод} \cdot i_{pn}$ . Враховуючи, що момент, який створює водій для ТЗ категорії М3 [17, 22] складає  $M_{вод} = 50$  Н·м та передаточне відношення редуктора рульового приводу [32]  $i_{pn} = 23,2$  обертальний момент двигуна, який застосовується у системі рульового керування тролейбусу має складати  $M_{ДРК} = 4000$  Н·м.

### 2.1.3 Розрахунок параметрів ДРК.

Використання запропонованого у роботі електричного двигуна з ротором що котиться у якості підсилювача рульового приводу системи рульового керування тролейбуса насамперед пов'язано з його технічними характеристиками. Вони ґрунтуються на тому, що конструктивні особливості ДРК при його відносно малих розмірах дозволяють йому досягати високих обертальних моментів при низькій частоті обертання вихідного валу (0,1-1 рад/с). Це, безумовно, дозволяє використовувати його у безредукторному електроприводі. Технічно вважається, що ДРК представляє собою синхронну вентильну реактивну електричну машину [52, 88-90].

Особливістю реактивних електричних двигунів є наявність ротора, який зроблений повністю із заліза та немає обмоток збудження. Також відсутність перехідних електричних контактів або постійних магнітів робить даний тип двигунів простим та надійним [90, 91].

Принцип дії реактивних двигунів заснований на використанні змінного магнітного опору магнітної системи електричної машини. Такі двигуни сконструйовані таким чином, що між ротором та статором існує несиметричний повітряний магнітний проміжок (рис. 2.5).

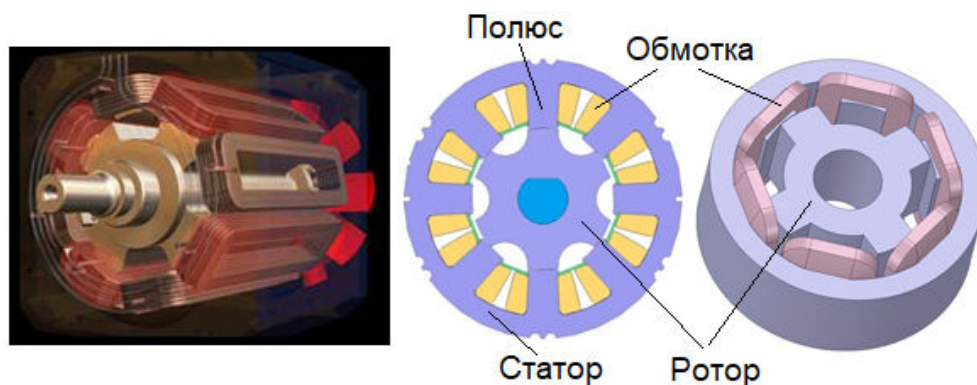


Рисунок 2.5 – Характерний вигляд вентильних реактивних двигунів

Під час роботи вентильний двигун намагається зайняти положення з мінімальним магнітним опором, а виникаюча результуюча сила створює обертальний момент [92].

Особливістю ДРК є ексцентричне розташування ротору відносно розточки статора (див. рис. 2.6) [52, 57–59, 88–90].

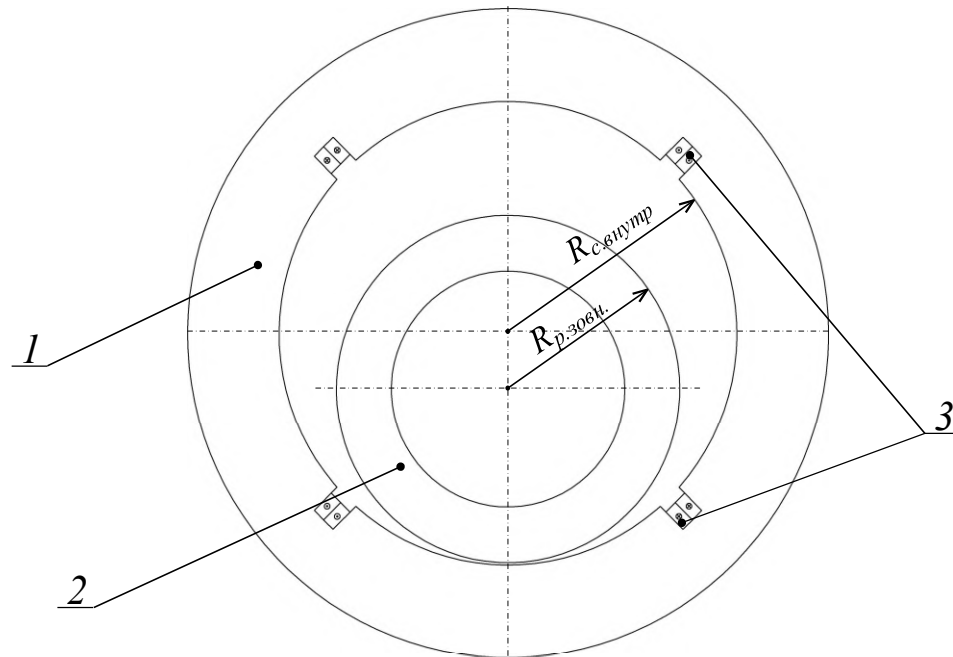


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд двигуна з ротором що котиться у поперечному перерізі: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – кінці обмотки полюсу статора;  $R_{c.внутр}$  – внутрішній радіус розточки статора;  $R_{p.зовн.}$  – зовнішній радіус ротора.

Це свідчить про наявність асиметричного повітряного зазору між статором та ротором. Під час руху ротора робочий магнітний зазор постійно змінюється і тому виникає магнітне поле, яке змінюється у часі та просторі. Це призводить до створення обертового моменту двигуна.

Різні радіуси ротору та статора викликають переміщення ротора у середині статора ДРК. Це відбувається під впливом сили магнітного тяжіння за рахунок магнітних полюсів статора. Ротор котиться по розточці статора синхронно зі швидкістю обертання магнітного поля статора [52, 69, 88].

Одночасно з магнітним полем відбувається обертання осі ротора навколо осі симетрії статора. При цьому ротор обертається відносно своєї осі у протилежну сторону від напрямку обкатування. Кутова швидкість обертання

вихідного валу ротора ДРК (за умови обкатування без проковзування) визначається за виразом [52, 89]:

$$\omega_p = \omega_c \frac{R_{c.внутр.} - R_{p.зовн.}}{R_{p.зовн.}} \quad (2.1)$$

де  $\omega_c$  – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с;

$R_{c.внутр.}$  – внутрішній радіус розточка статора, м;

$R_{p.зовн.}$  – зовнішній радіус ротора, м.

На практиці прямого контакту між статором та ротором може не бути, а у конструкції застосовуватимуться ходові направляючі, що жорстко пов'язані з ротором. У такому випадку редукція кутової швидкості обертання ротору визначається радіусами катків та направляючих [89].

Рух ротору, по відношенню до окремих полюсів статора ДРК, викликає динамічну зміну робочого повітряного зазору  $\delta_{(\varphi)}$  кожного з полюсів від максимального до мінімального значення на величину ексцентриситету  $e = \delta_{max} - \delta_{min}$ . Це впливає на магнітні параметри кожного полюсу ДРК. Тому при розрахунку ефективної магнітної сили кожного з полюсів це необхідно враховувати. Для розрахунку зміни магнітного зазору кожного з полюсів, відносно поточного положення ротору, використовується наступна математична залежність [69]:

$$\delta_{(\varphi)} = \sqrt{e^2 + R_{c.внут}^2 - 2 \cdot e \cdot R_{c.внут} \cdot \cos(\varphi)} - R_{p.зовн} \quad (2.2)$$

Дана залежність (2.2) необхідна при визначенні ефективної електромагнітної сили полюсу ДРК.

Для визначення геометричних розмірів та електромеханічних характеристик ДРК у роботі пропонується використовувати методи розрахунку вентильних реактивних електричних двигунів [92–96].

Визначення зовнішнього діаметра статора та його довжини, а також розмірів пазів наводяться [92–96]. Широкі діапазони співвідношень відповідних розмірів обумовлюються різноманіттям проектних варіантів.

Найбільш доцільною є методика [92], в основі якої лежить визначення максимального моменту при заданих геометричних розмірах та заданій щільності струму в обмотці.

Виходячи із запропонованої методики, в основі якої лежить використання довідкової інформації, яка отримана при проектуванні серійних та дослідних електричних двигунів для різних сфер застосування [92–96], відповідно до визначеного обертового моменту  $M_{ДРК} = 4000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , попередні геометричні розміри розрахункового ДРК складають: зовнішній діаметр статора  $d_n = 500 \text{ мм}$ , довжина статора  $l_n = 85 \text{ мм}$ .

При цьому система рульового керування тролейбусу має забезпечувати необхідні динамічні показники при повороті керованих коліс. Це виражається у здатності рульового приводу, з максимально можливою точністю та швидкістю, забезпечувати необхідні кути повороту керованих коліс відповідно до керуючого впливу водія тролейбусу при повороті рульового колеса.

Спираючись на аналіз літературних джерел [75, 76] швидкість повороту рульового колеса тролейбусу у середньому складає 0,5 об/с або 3,14 рад/с. Беручи до уваги технічні характеристики передньої керованої осі тролейбусу типу ЛАЗ-Е183D1 та його модифікацій (див. табл. 2.1) і передаточне відношення редуктора рульового приводу – номінальне значення кутової швидкості обертання вихідного валу електричного підсилювача рульового приводу на базі високомоментного ДРК складає  $\omega_p = 0,14 \text{ рад/с}$ .

Електромагнітний момент ДРК залежить від магнітних властивостей осердя електричної машини, кількості статорних котушок та струму в них [97–102]. В ідеальних умовах (коли не враховується наявність ексцентриситету, а значить і нерівномірного повітряного зазору) кожна



котушка статора створює рівну силу одностороннього магнітного тяжіння [102].

За рівних умов (геометрії електричної машини та навантаження на валу), але з різною кількістю полюсів електричної машини з ротором що котиться, обертальний момент залежить лише від вектору результуючої сили магнітного тяжіння. Збільшення кількості статорних котушок у ідеальних умовах веде до збільшення вектору сили магнітного тяжіння, отже і до збільшення обертального моменту двигуна [102].

Однак нерівномірність магнітного зазору по відношенню до полюсів ДРК впливає на величину магнітної індукції, що створюється котушками статора, тому вектор сили магнітного тяжіння буде зменшуватися пропорційно збільшенню повітряного зазору [102].

Збільшення кількості котушок статора в тих же габаритах електричної машини може негативно впливати на вектор загальної сили одностороннього магнітного тяжіння. Насамперед це пов'язано зі зменшенням площі активної поверхні полюсу статора, оскільки обмотки полюсів необхідно вкладати у пази [102].

Характерним моментом при визначенні кількості статорних котушок та магнітної сили, що створюється у полюсах при протіканні електричного струму є забезпечення необхідних динамічних властивостей електричного кола котушки статора ДРК. Підвищення енергоефективності ДРК при збереженні необхідної магнітної індукції, яка бере участь у створенні магнітної сили полюсу можливе за рахунок зменшення сили струму в котушці при збільшенні кількості витків. Однак це призводить до збільшення індуктивності котушки полюсу статора, що у свою чергу призводить до збільшення постійної часу перехідних процесів у електричному колі котушки згідно:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.3)$$

де  $L$  – індуктивність котушки, Гн;

$R$  – опір котушки, Ом.

Забезпечення необхідної величини постійної часу можливе за рахунок збільшення електричного опору котушки. Максимальний електричний опір обмежений можливостями силової мережі живлення ДРК та номінальним струмом котушки.

Попередній розрахунок геометричних розмірів листів магнітопроводу з полюсами електричної машини проводиться виходячи з отримання максимальної енергії магнітного поля у зазорі. Енергетичні та масогабаритні показники ДРК жорстко пов'язані з геометричними співвідношеннями розмірів спинок, зубців статора, внутрішнього діаметра статора та величини повітряного зазору, тобто зі зміною конфігурації магнітопроводу. При цьому чим більша енергія, яка концентрується у магнітному зазорі тим більший електромагнітний момент. Внутрішній діаметр статора  $d_i$  рекомендується вибирати у межах  $(0,5-0,8) \cdot d_n$  [92–96]. Розрахункова схема геометричних розмірів магнітопроводу статора зображена на рисунку 2.7.

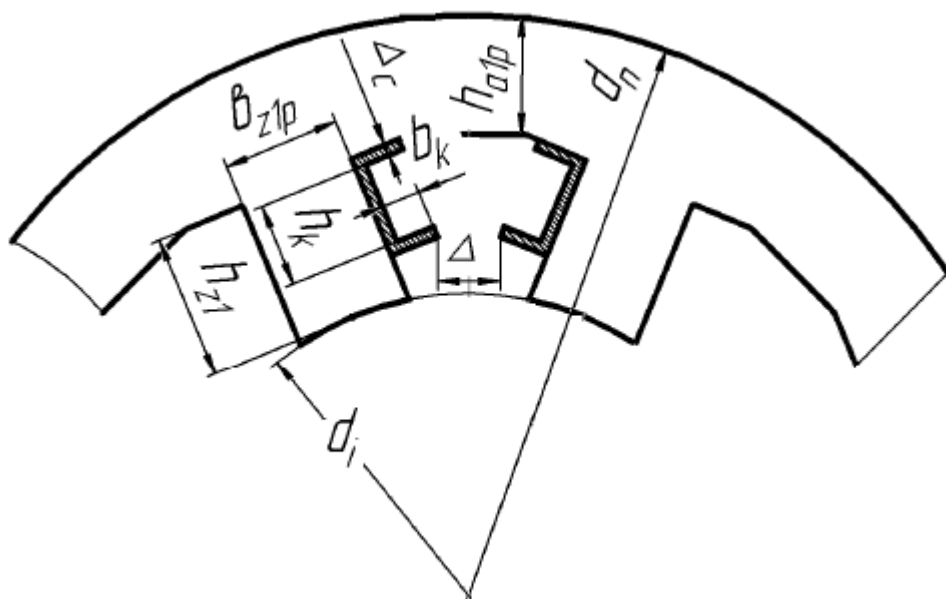


Рисунок 2.7 –Визначення геометричних розмірів магнітопроводу статора

Ширина зубця статора визначається [92]:

$$b_{z1p} = d_i \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N_c}\right) \quad (2.4)$$

де  $d_i$  – внутрішній діаметр статора, м;

$N_c$  – кількість котушок статора.

Висота зубця статора [92]:

$$h_{z1} = \left[ \frac{d_n - k_2 \cdot d_i \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right)}{2} \right] - \frac{d_i}{2} \quad (2.5)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт зубця статора,  $k_2 = \frac{h_{a1p}}{0,5 \cdot b_{z1p}}$ . Для попередніх

розрахунків приймається у діапазоні 1,7–2,2 [92].

Висота спинки статора [92]:

$$h_{a1p} = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot b_{z1p} \quad (2.6)$$

Ширина перерізу обмоточної зони каркаса вибирається максимально можливою за умови забезпечення зазору між краями каркасів сусідніх котушок [92].

$$b_k = \frac{d_i \left( \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{0,5 \cdot N_c}\right) - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N_c}\right) \right)}{2} - \Delta_c - \frac{\Delta}{2} \quad (2.7)$$

де  $\Delta_c$  – товщина стінок каркасу котушки, м;

Висота перерізу обмоточної зони каркасу котушки статора [92]:

$$h_k = \left\{ \frac{\left( d_n - k_2 \cdot d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2 \cdot N_c} \right) \right)^2}{4} - \frac{\left( d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{N_c} \right) \right)^2}{4} \right\}^{0,5} - \left( \frac{d_i}{2} \right) - 2 \cdot \Delta_c \quad (2.8)$$

Знаючи ширину та висоту перерізу обмоточної зони з визначеною щільністю струму котушки  $j$  (А/м<sup>2</sup>) та коефіцієнтом заповнення  $f_z$  можливо визначити загальну МРС та МРС повітряного зазору:

$$F_m = b_k \cdot h_k \cdot j \cdot f_z \quad (2.9)$$

$$F_\delta = \frac{2 \cdot B_\delta \cdot \delta}{\mu_0} \quad (2.10)$$

де  $B_\delta$  – індукція у повітряному зазорі, Тл;

$\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

Спираючись на запропоновану вище методику [92–96] результатом розрахунку стало визначення технічних та масогабаритних характеристик ДРК, який має застосовуватися у якості підсилювача рульового приводу системи рульового керування на базі тролейбусу типу ЛАЗ-Е183D1 або його модифікацій. Розраховані дані зведено до таблиці 2.5.

Однак даний розрахунок не дає повної характеристики електромагнітних перетворень, які відбуваються у магнітній системі ДРК. Оскільки ДРК має складну магнітну систему, необхідно провести її комплексний розрахунок за допомогою методів моделювання магнітного поля.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристики ДРК підсилювача РП.

Параметр	Величина
Номинальна напруга, В	400
Номинальний струм котушки, А	1,6
Номинальна частота обертання вихідного валу, об/хв	1,4
Статичний момент на валу при номінальному струмі одночасно увімкнених 24 котушок статора на проміжку 0 до $\pi$ від точки контакту з ротором, Н·м	4100
Число полюсів	48
Зовнішній діаметр статора, мм	500
Внутрішній діаметр статора, мм	420
Зовнішній діаметр ротора, мм	419,8
Внутрішній діаметр ротора, мм	340
Висота спинки статора, мм	25
Висота зубця статора, мм	15
Ширина зубця статора, мм	20
Довжина осердя ротора, мм	85
Маса ротора, кг	25
Загальна вага осердя статора, кг	34
Ексцентриситет, мм	0,2
Висота перерізу обмоточної зони каркасу, мм	12
Ширина перерізу обмоточної зони каркасу, мм	5
Кількість витків котушки	300
Опір котушки, Ом	200
Індукція у тоці мінімального магнітного зазору при номінальному струмі котушки статора, Тл	1,8
Матеріал осердя	Сталь 2212

## 2.2 Дослідження магнітного поля ДРК

### 2.2.1 Методи розрахунку магнітного поля.

В електромеханічних системах взаємодія електричної та механічної підсистем відбувається за рахунок магнітного поля. Таким чином, магнітне поле впливає на перетворення електричної та механічної енергії в системі електроприводу. При цьому також відбуваються різні зміни властивості магнітного поля при перехідних процесах.

В електроприводі важливу роль відіграють, наприклад, сила Лоренца та явища магнітнорезистивного ефекту. Саме з цієї причини необхідно провести аналіз впливу магнітного поля на електромеханічну систему ДРК до початку описання математичної моделі.

Як відомо, магнітне поле у феромагнітних матеріалах має значну нелінійну поведінку. Ці властивості суттєво впливають на роботу електроприводу. Тому при моделюванні системи електроприводу такі властивості поведінки магнітного поля необхідно враховувати.

Поведінку магнітного поля та динамічних процесів взаємодії магнітного та електричного полів ДРК, який використовується у конструкції електричного підсилювача рульового приводу, можна описати за допомогою рівнянь Максвелла, які є основою для характеристики таких процесів. У даному випадку використовується форма запису рівнянь у диференційному вигляді. Диференційна форма запису дозволяє робити висновки про локальні величини індукції та напруженості магнітного поля у будь-якій точці магнітної системи електричного двигуна.

Для характеристики взаємодії полів обраний метод диференціювання на базі рівнянь Максвелла у диференційній формі, які складають основу теорії електромагнітного поля з урахуванням наступних законів [105, 106]:

## 1. Закон Гауса

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.11)$$

де  $\vec{D}$  – вектор електричної індукції;

$\rho$  – густина вільних зарядів.

## 2. Закон Гауса для магнітного поля:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

де  $\vec{B}$  – вектор магнітної індукції.

## 3 Закон Фарадея:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

де  $\vec{E}$  – вектор напруженості магнітного поля;

$t$  – час.

## 4 Закон Ампера:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.14)$$

де  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля;

$\vec{j}$  – густина електричного струму.

Мінливість електромагнітного поля з плином часу – це є особливість, яка враховується при математичному представленні електромеханічної системи. Використання рівнянь Максвелла для характеристики змінного з часом електромагнітного поля сприяє спрощенню математичної моделі і дає

можливість його представлення у вигляді часткових похідних. У рівняннях Максвелла електромагнітні процеси описуються такими основними змінними, як вектор напруженості магнітного поля  $H$ , вектор напруженості електричного поля  $E$ , вектор магнітної індукції  $B$ , вектор електричної індукції  $D$  [105, 106].

На поведінку електромагнітного поля суттєвий вплив має середовище, у якому воно розповсюджується. Властивості середовища характеризуються параметрами діелектричної проникності  $\varepsilon$ , магнітної проникності  $\mu$ , питомої електропровідності  $\sigma$ . Залежності між складовими електромагнітного поля визначаються через властивості матеріалу:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (2.15)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.17)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу;

$\varepsilon_0$  – діелектрична постійна вакууму;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу.

Магнітна проникність впливає на магнітне поле та характеризує поведінку середовища. В залежності від властивостей феромагнітного матеріалу магнітопроводу відбувається зміна магнітної провідності під впливом магнітного поля і створюється магнітна поляризація. Це призводить до зміни вектору магнітної індукції  $B$  [105, 106]. Така поведінка феромагнітних матеріалів дає вирішальний вплив на структуру та поведінку магнітного поля в електромеханічній системі.

Магнітне поле є елементом моделі системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем керма на базі ДРК та пов'язує її електричну та механічну частину. На поведінку та властивості магнітного поля фундаментально впливають властивості матеріалу, його форма та геометричні розміри.



### 2.2.2 Основні положення методу скінченних елементів.

Для розрахунку параметрів та аналізу поведінки магнітного поля ДРК у електромеханічній системі рульового керування використовуються чисельні методи, а саме метод скінченних елементів, який є найбільш розповсюдженим та доступним на цей час.

Основна ідея методу скінченних елементів – це побудова мережі скінченних елементів середовища за допомогою розбивки прямих та кривих ліній на малі частини, які мають скінченні розміри. Завдяки даному методу можна отримати точні результати досліджень [108–119].

При вирішенні двовірних завдань скінченні елементи найчастіше мають форму трикутників. Скінченні елементи не перекривають один одного. Точки на вершинах скінченних елементів називають вузловими. Саме у вузлових точках проводиться розрахунок шуканих параметрів. Скалярний магнітний потенціал кожного скінченного елемента представляється у вигляді поліному з постійними у межах цього елемента коефіцієнтами [108].

Для розрахунку параметрів стаціонарного магнітного поля методом скінченних елементів для двовірної моделі використовується мінімізація нелінійного енергетичного функціоналу [108, 111]:

$$F = \int_S \left( \int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS - \int_S \vec{A} \cdot \vec{\delta} dS, \quad (2.18)$$

де  $S$  – площа розрахунку магнітного поля;

$B_x, B_y$  – складові вектору магнітної індукції у декартовій системі координат;

$\vec{A}$  – векторний магнітний потенціал;

$\vec{\delta}$  – щільність струму у обмотці.

Складові вектори магнітної індукції визначаються за наступними виразами [108, 111]:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad (2.19)$$

$$B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}. \quad (2.20)$$

У площині розрахунку  $S$  задано  $r$  трикутників, які мають  $n$  вершин. Енергетичний функціонал за рівнянням (2.18) можна апроксимувати кусочно-лінійним функцією вигляду [108, 111]:

$$F = \sum_{m=1}^{m=r} \int_{S_m} \left( \int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y - A \delta_m \right) dS \quad (2.21)$$

$$F = \sum_{m=1}^{m=r} F^m = F^1 + F^2 + \dots + F^r, \quad (2.22)$$

де  $\delta_m$  – щільність струму в трикутному елементі;

$S_m$  – площа трикутника скінченного елемента.

Векторний магнітний потенціал, який концентрується всередині кожного трикутного скінченного елемента, описується лінійною функцією значень енергетичних потенціалів у вершинах цього елемента [108, 111]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^m}{\partial A_i} &= \frac{1}{4 \mu_m S_m} \left[ (c_i^2 + b_i^2) A_i + (c_i c_j + b_i b_j) A_j + (c_i c_k + b_i b_k) A_k \right] - \frac{\delta S_m}{3}; \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_j} &= \frac{1}{4 \mu_m S_m} \left[ (c_i c_j + b_i b_j) A_i + (c_i^2 + b_i^2) A_j + (c_j c_k + b_j b_k) A_k \right] - \frac{\delta S_m}{3}; \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_k} &= \frac{1}{4 \mu_m S_m} \left[ (c_i c_k + b_i b_k) A_i + (c_j c_k + b_j b_k) A_j + (c_k^2 + b_k^2) A_k \right] - \frac{\delta S_m}{3}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

де  $A_i, A_j, A_k$  – значення векторного потенціалу при вершинах трикутника скінченного елемента  $i, j, k$ ;

Коефіцієнти  $b$ ,  $c$  визначаються за координатами  $x$ ,  $y$  декартової системи координат при вершинах трикутника  $m$ -го скінченного елемента [108, 111]:

$$\begin{aligned} b_i &= y_j - y_k; & c_i &= x_k - x_j; \\ b_j &= y_k - y_i; & c_j &= x_i - x_k; \\ b_k &= y_i - y_j; & c_k &= x_j - x_i, \end{aligned} \quad (2.24)$$

Площа трикутного елемента  $S_m$  визначається [108, 111]:

$$S_m = 0,5 (x_i b_i + x_j b_j + x_k b_k). \quad (2.25)$$

Векторний магнітний потенціал усередині кожного трикутного скінченного елемента визначається виразом [108, 111]:

$$A = \frac{1}{S_m} \left[ (a_i + b_i x + c_i y) A_i + (a_j + b_j x + c_j y) A_j + (a_k + b_k x + c_k y) A_k \right]. \quad (2.26)$$

Магнітна індукція в межах скінченного елемента розраховується за виразом [77]:

$$B = \frac{1}{2 S_m} \sqrt{(c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k)^2 + (b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k)^2}. \quad (2.27)$$

Система рівнянь для пошуку мінімуму енергетичного функціоналу має у своєму складі скінченну кількість точок. Кількість членів рівняння залежить від кількості трикутних скінчених елементів із загальними вершинами в точці розрахунку.

Рішення системи рівнянь мінімуму енергетичного функціоналу зводиться до вирішення системи лінійних рівнянь з нелінійними коефіцієнтами [108, 111]:

$$T \times A = \Delta, \quad (2.28)$$

де  $T$  – матриця коефіцієнтів, складена з матриць коефіцієнтів трикутних скінченних елементів.

Матриця коефіцієнтів розраховується за виразом [108, 111]:

$$G = \frac{1}{4\mu_m} \begin{matrix} i \\ j \\ k \end{matrix} \left| \begin{matrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{matrix} \right| \quad (2.29)$$

$$\begin{matrix} i & j & k \end{matrix}$$

де  $i, j, k$  – номери елементів матриці;

$b, c$  – коефіцієнти, що визначаються за координатами вершин трикутника;

$\mu_m$  – магнітна проникність  $m$ -го трикутника.

Вектор стовпець  $\Delta$  складається з векторів стовпців скінченних елементів за виразом [108, 111]:

$$\Delta = \frac{J_m S_m}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

де  $J_m$  – щільність струму в трикутнику.

За складеними матрицями  $T$  і  $\Delta$  визначаються граничні умови методом прирівнювання до нуля усіх елементів тих рядка і стовпця матриці  $T$  де номер діагонального елемента співпадає з номером точки векторного потенціалу [108, 111].

### 2.2.3 Інструменти розрахунку та моделювання магнітного поля.

Для моделювання електромагнітних процесів ДРК у роботі застосовується програмний комплекс FEMM. Він дозволяє розраховувати параметри магнітної системи з достатньо високим ступенем точності та достовірності. Головною відмінністю програми FEMM є час розрахунку конкретної електромагнітної задачі, можливості і швидкості побудови розрахункової сітки та зручність інтерфейсу [112, 118].

Програма FEMM дозволяє створювати моделі для розрахунку плоскопаралельного або асиметричного стаціонарного, квазістаціонарного магнітного та електростатичного полів і побудову їхніх картин. Наявність пакетного режиму та інтеграція загальнодоступної алгоритмічної мови програмування Lua робить дане програмне забезпечення потужним засобом дослідження.

У своєму складі програма FEMM має:

- препроцесор, призначений для визначення властивості матеріалів системи, граничних умов моделювання, побудови розрахункової сітки методом тріангуляції;
- постпроцесор, що дозволяє проводити обробку результатів моделювання, відображати розраховану картину магнітного поля, визначати польові та ланцюгові параметри магнітної системи у заданих точках.

Головною перевагою обраного інструменту розрахунку та моделювання є широкий набір форматів представлення розрахункових даних, що забезпечує простий перенос та адаптацію даних між програмними пакетами.

### 2.2.4 Моделювання магнітного поля ДРК.

Проведення моделювання магнітної системи ДРК дозволяє отримати інформацію про характер зміни магнітних характеристик електричної машини під час роботи. Отримана модель при цьому наближує характер процесів електричної машини до реальних, та враховує локальні насичення та нелінійну поведінку магнітної системи ДРК.

За визначеними геометричними та електричними параметрами ДРК (див. табл. 2.5) проводиться розрахунок магнітних характеристик ДРК. Даний розрахунок ведеться з використанням програмного комплексу FEMM. Під час розрахунку не враховується вплив гістерезису на поведінку магнітної системи. Також не враховуються вплив вихрових струмів в осерді електричної машини.

Розрахунок магнітних характеристик ДРК ведеться для проміжних положень відносно осі симетрії полюса ДРК та точки мінімального магнітного зазору у діапазоні кута повороту від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  з кроком  $7,5^\circ$ . При цьому кожна ітерація зміни кута повороту супроводжується зміною струму у обмотці полюсу ДРК у діапазоні від 0,1 А до 2,1 А з кроком у 0,1 А.

Межі граничного струму вибираються з урахуванням магнітних властивостей обраного матеріалу осердя, габаритних характеристик ДРК та кількості витків котушки полюсу для роботи ДРК у межах лінійної ділянки кривої намагнічування сталі (див. рис. 2.8). Крива намагнічування апроксимована кусочно лінійними функціями.

Для отримання сімейства магнітних та механічних характеристик двигуна, що розраховується, а також автоматизації процесів розрахунку було розроблено макрос на мові програмування Lua, який наведено у додатку А.

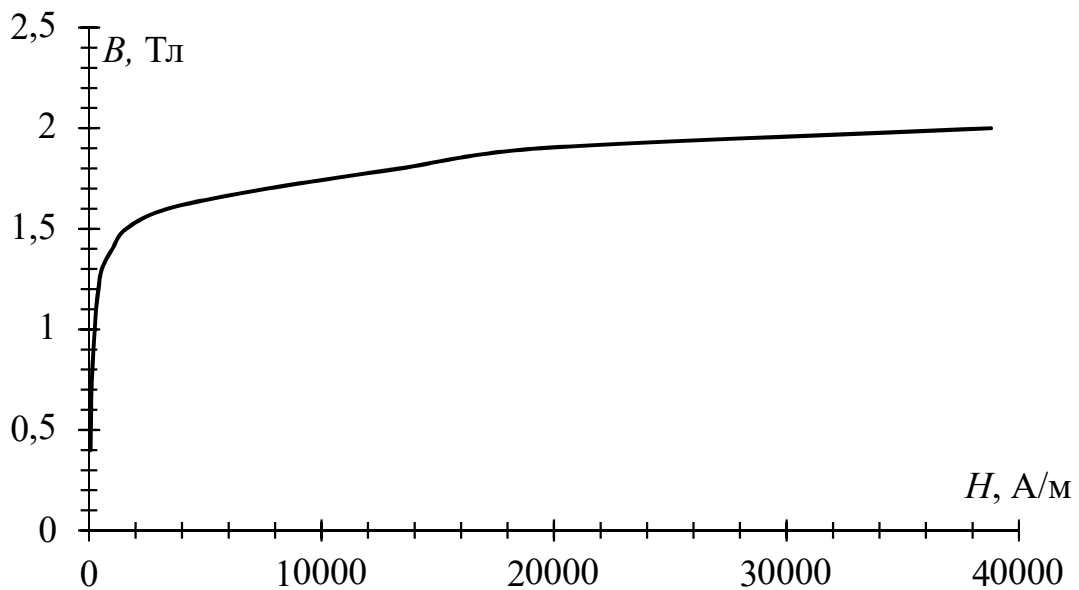


Рисунок 2.8 – Крива намагнічування сталі 2212

Для того, щоб рівняння методу скінченних елементів мали рішення, до них додаються граничні умови [52]:

– граничні умови першого роду (Дирихле) – на межі задається значення функції векторного магнітного потенціалу  $A = f_1(x, y)$ , де  $(x, y)$  – точки з декартовими координатами, що належать межі області. Умова  $A = 0$  є однорідною;

– граничні умови другого роду (Неймана). Їх задається зміна функції магнітного потенціалу нормалі  $n$  до межі області, тобто.  $dA/dn = f_2(x, y)$ . Умова  $dA/dn = 0$  є однорідною.

– граничні умови третього роду  $dA/dn + f_3(A) = f_4(x, y)$ , де точки з координатами  $(x, y)$  належать межі області.

На рисунку 2.9 продемонстрована розрахункова область високомоментного ДРК у програмі FEMM. Виходячи з методу скінченних елементів, розрахункова область (див. рис. 2.9) розбита на скінченні елементи за допомогою алгоритму триангуляції. Щільність сітки збільшується для областей розрахунку де повітряний зазорів мінімальний, а також у зонах, де зосереджено основне напруження магнітного поля та потоки розсіювання.

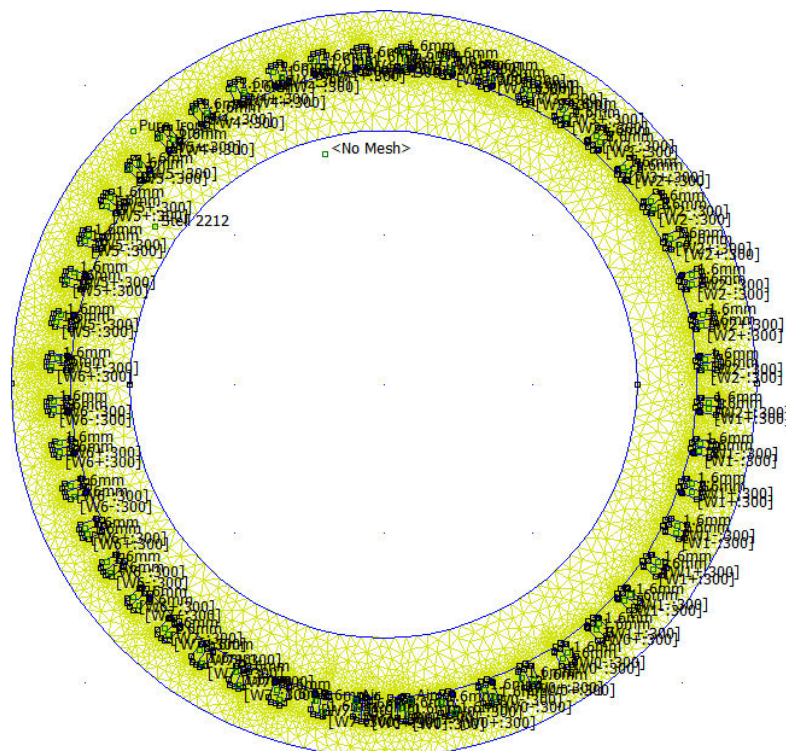


Рисунок 2.9 – Розрахункова область поперечного перетину ДРК.

Особливістю ДРК під час накладання скінченноелементної сітки на розрахункову область при малій різниці діаметрів ротора і статора (0,1-1 мм) є наявність повітряного зазору, який сходиться у точку. Програмний комплекс FEMM здатний впоратися з цим завданням, проте час розрахунку при цьому суттєво збільшується та з'являються похибки в розрахунку. У роботі пропонується використовувати підхід, який розглядається у [52]. Суть підходу полягає у тому, реальний повітряний зазор замінюється на зазор з прямокутною областю у зоні контакту ротора зі статором. При цьому висота прямокутної ділянки відповідає довжині повітряного зазору при точковому контакті статора із ротором. Такий підхід дозволяє знизити кількість елементів скінченноелементної сітки на два порядки. Слід зазначити, що проведені дослідження [52] показали, що контактна ділянка існує в реальних ДРК під час роботи та може впливати на розподіл магнітної індукції у повітряному зазорі, що в свою чергу сприяє збільшенню крутного моменту двигуна. Розрахункова область зони мінімального магнітного зазору ДРК зображена на рисунку 2.10.

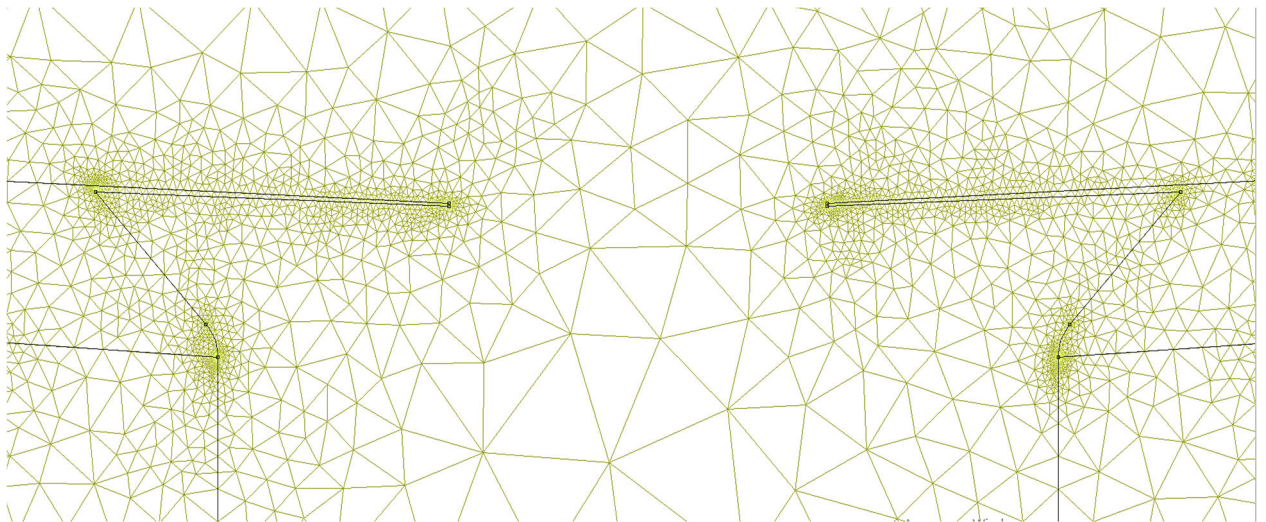


Рисунок 2.10 – Розрахункова область зони мінімального магнітного зазору ДРК

На кожному етапі розрахунку визначаються величини потокозчеплення полюсу ДРК, величини радіальної та тангенціальної сили, які створюються при протіканні струму через котушку полюсу, магнітна сила полюсу, електромагнітний момент, який може створити полюс, струм котушки.



Величину потокозчеплення обмотки полюсу ДРК, за результатами розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів можливо визначити використовуючи наступний вираз [108]:

$$\Psi = \int_s B dS = l_n \cdot \int_l B dl, \quad (2.31)$$

де  $dS$  – елементарна площа активної поверхні статора,  $m^2$ ;

$dl$  – елементарна довжина дуги окружності активної поверхні статора,  $m$ .

При цьому величина магнітної індукції  $B$  визначається виразом  $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ . Спираючись на [108] вираз для потокозчеплення прийме вигляд:

$$\Psi_{i,i+1} = (A_{i+1} - A_i)l_\delta, \quad (2.32)$$

де  $A_{i+1}, A_i$  – потенціали на ділянці дуги  $l$ .

Провівши інтегрування усіх витків котушки для потокозчеплення  $\Psi$  отримаємо вираз:

$$\Psi = l_\delta \sum_{i=1}^{n-1} (A_{i+1} - A_i) = l_\delta \sum_K w(A_n - A_1), \quad (2.33)$$

де  $A_n, A_1$  — потенціали в провідниках обмотки;

$K$  – кількість секцій котушки;

$w$  – кількість витків.

Слід зазначити, що процес визначення магнітної індукції та потокозчеплення у програмному комплексі FEMM автоматизований.

Розрахунок магнітної сили полюсу визначається як [52]:

$$F_{mag} = \int \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \cdot dS, \quad (2.34)$$

Визначення радіальної та тангенціальної сили, враховуючи достатньо малий ексцентриситет розрахованого ДРК ( $e = 0,2$  мм), проводиться за наступними виразами:

$$F_x = \int \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \cdot dS \cdot \cos\alpha, \quad (2.35)$$

$$F_y = \int \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \cdot dS \cdot \sin\alpha, \quad (2.36)$$

де  $\alpha$  – кут між точкою мінімального магнітного зазору та центром полюсу, град.

Електромагнітний момент полюсу двигуна визначається за виразом [52]:

$$M_e = F_y \cdot R_{p.зовн} \cdot \sin\alpha = \frac{\pi \cdot B_{\delta}^2 \cdot d_r^2 \cdot L_a \cdot k_z}{4 \cdot \mu_0 \cdot z_s} \cdot \sin\alpha, \quad (2.37)$$

де  $d_r$  – зовнішній діаметр ротора, м;

$L_a$  – активна довжина осердя статора, м;

$k_z$  – відносна довжина зубця статора;

$z_s$  – кількість зубців статора;

Для автоматизації процесу розрахунку у роботі розроблено макрос на мові LUA, що наведено у Додатку А. Результати розрахунку автоматично зводяться до таблиці (див. Додаток Б).

За результатами розрахунків на кожному етапі формується картина розподілу магнітного поля, яке створюється полюсом ДРК.

На рисунку 2.11 наведено картину розподілу магнітного поля ДРК, що досліджується при початковому положенні точки з мінімальним магнітним зазором та полюсом, а також номінальним значенням струму у котушці.

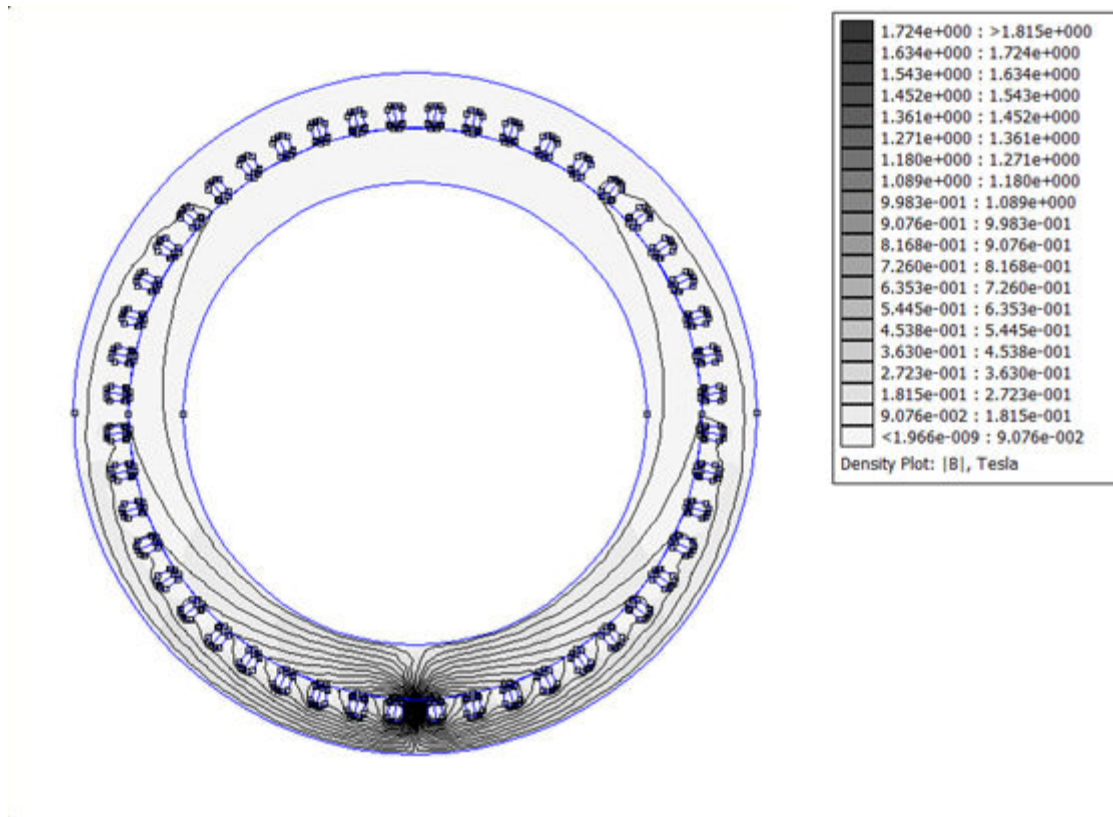


Рисунок 2.11 – Картина розподілу магнітного поля котушки ДРК

Важливим фактором для подальшого використання отриманої моделі магнітного поля запропонованого ДРК є зміна електромагнітної індукції у зазорі при переміщенні між полюсами ДРК. Нерівномірна зміна індукції відносно положення ротора між полюсами може негативно впливати на обертальний момент. Даний фактор необхідно враховувати у подальшому для створення достовірної математичної моделі рульового керування.

На рисунку 2.12 представлено картини розподілу магнітного поля для різних положень точки мінімального магнітного зазору відносно полюсу при номінальному струмі.

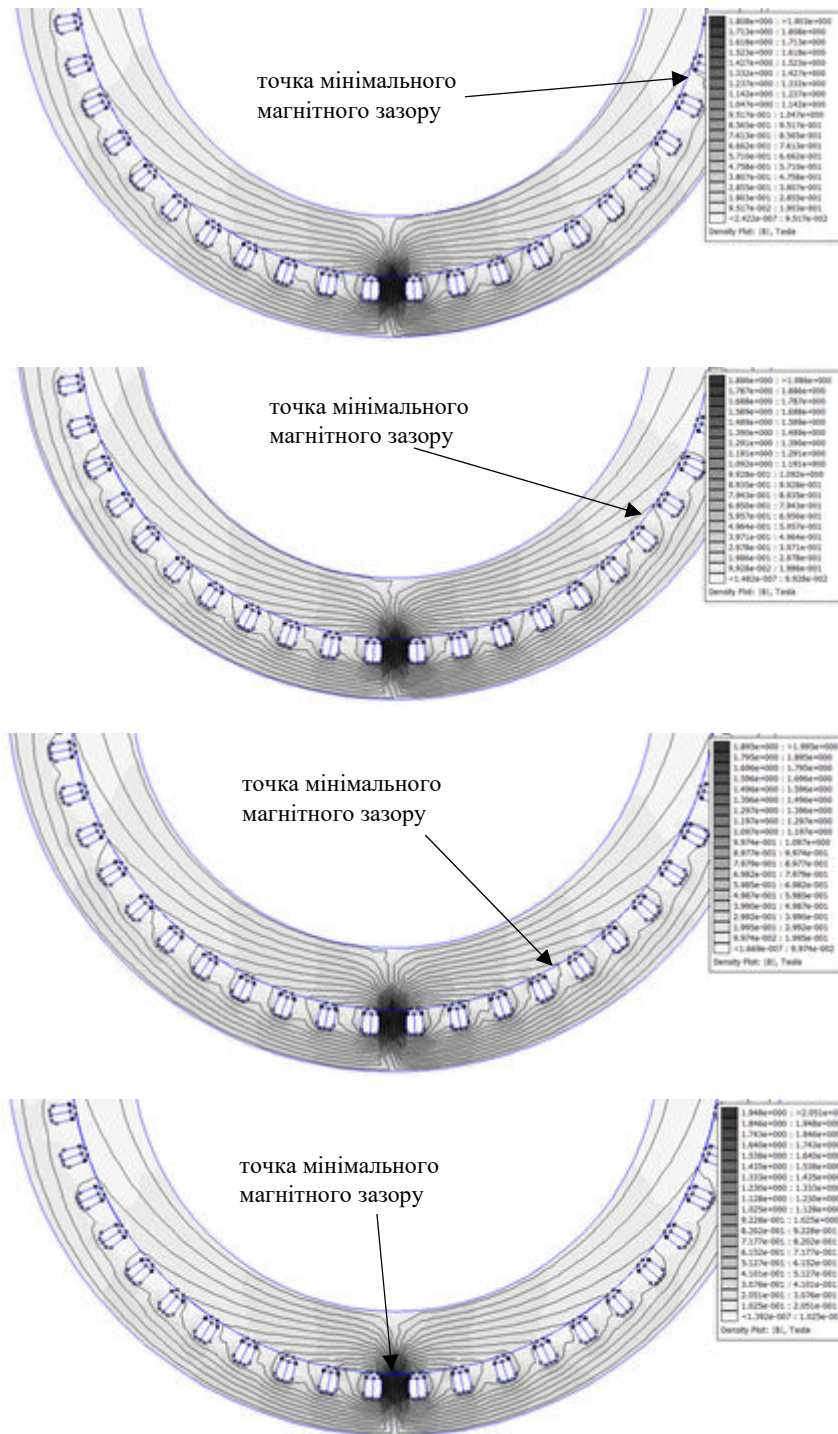


Рисунок 2.12 – Картина розподілу магнітного поля при різних положеннях точки мінімального магнітного зазору відносно полюсу

За отриманими розрахунковими даними (див. Додаток Б), а також зображеній на рисунку 2.12 картині магнітного поля можна побачити, що характер магнітного поля двигуна при різних кутах повороту близький один

до одного. Така поведінка магнітного поля пов'язана з достатньо малою різницею між діаметрами статора та ротора ДРК, а відповідно й малим ексцентриситетом та магнітним зазором. Зі збільшенням магнітного зазору між полюсом статора та ротором спостерігається зменшення індукції магнітного поля у зазорі.

За отриманими розрахунковими даними магнітного поля ДРК (див. Додаток Б) побудовано сімейство характеристик потокозчеплення полюсу ДРК що досліджується, які зображені на рисунках 2.13 – 2.14.

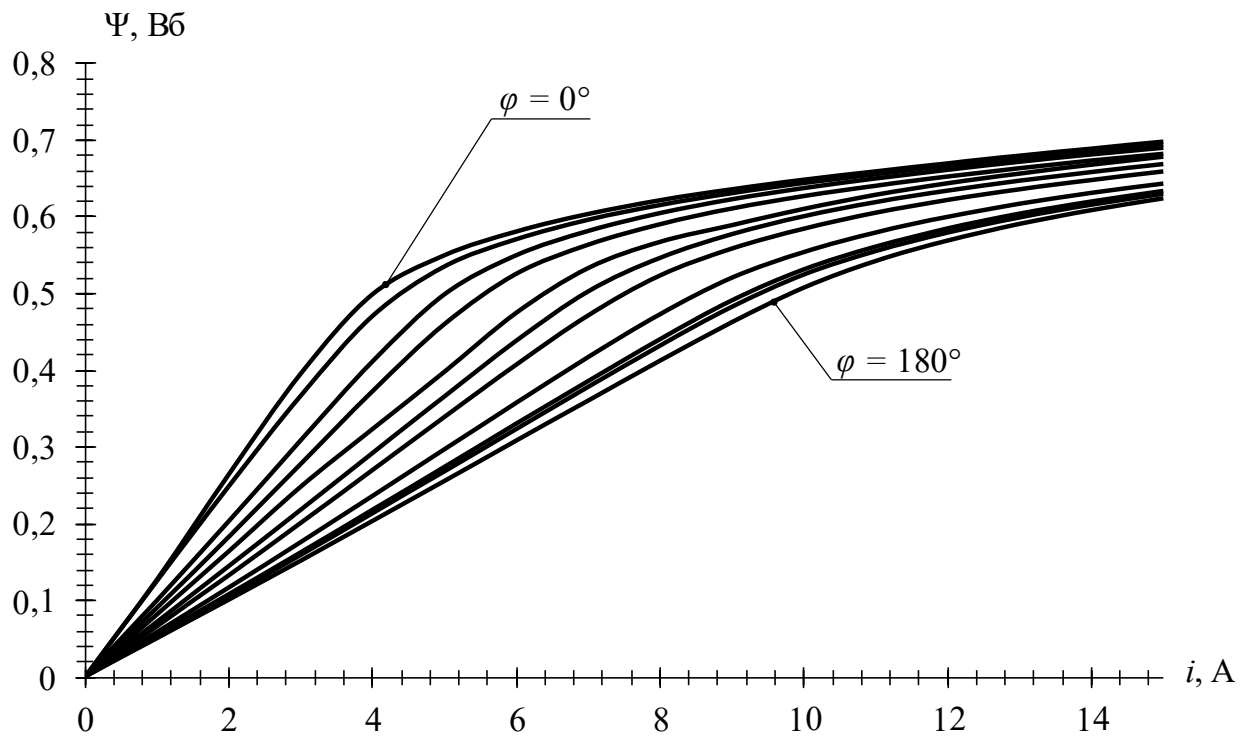


Рисунок 2.13 – Залежність потокозчеплення від струму котушки полюса ДРК

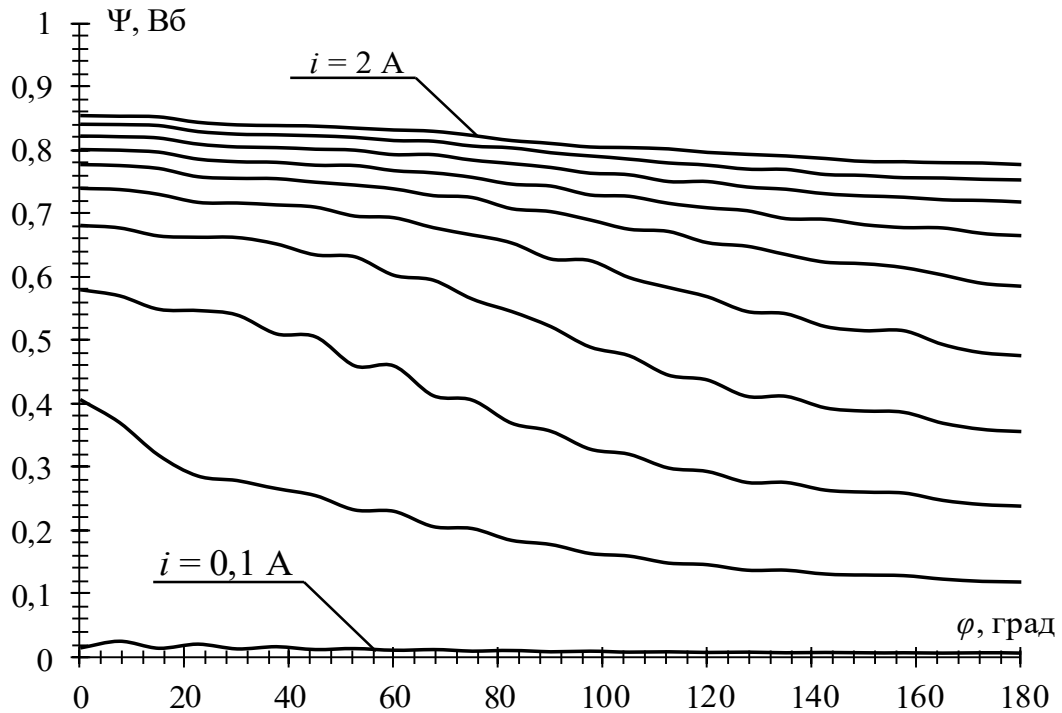


Рисунок 2.14 – Залежність потокозчеплення від кута між мінімальним магнітним зазором та полюсом ДРК

За результатами розрахунку отримано набір дискретних даних (див. додаток Б), який не дає можливості використовувати його у повній мірі для дослідження властивостей системи рульового керування. В такому випадку необхідно створення неперервної математичної моделі магнітних та механічних характеристик за допомогою регресійного аналізу [120, 121].

#### 2.2.5 Методи регресійного аналізу розрахункових даних.

Для розв'язання практичних та теоретичних задач у ході обробки експериментальних або статистичних даних у представленому дисертаційному дослідженні використовуються методи апроксимації, завдяки яким вирішується задача наближення функції. Особливо це важливо тоді, коли отримані результати дослідження представлені дискретними значеннями, які надалі потрібно використовувати для математичного моделювання роботи системи рульового керування.

Задача наближення функції є допоміжним апаратом при розв'язанні задач чисельного аналізу (інтегрування, диференціювання, розв'язання систем

диференціальних рівнянь). Задачі наближення функції можуть бути представлені широким вибором методів [109, 120–126]:

- апроксимація за допомогою алгебраїчних інтерполяційних поліномів;
- апроксимація методом найменших квадратів;
- інтерполяції Лагранжа;
- апроксимація інтерполяційним поліномом Ньютона;
- апроксимація інтерполяційними сплайнами;
- апроксимація функцій рядами Фур'є;
- апроксимація експоненціальними функціями.

В цілому, ключовий момент вирішення задач апроксимації та визначення необхідних параметрів полягає у виборі класу наближеної функції. Основна вимога до таких функцій – незалежність результатів розрахунку від початку системи відліку, тобто від зміщення за послідовністю значень аргументу.

Для ефективного вирішення практичних задач дисертаційної роботи, для обробки експериментальних даних використовувався метод апроксимації інтерполяційним сплайном. Сплайни представляють собою кусочно-задану функцію, де кожний елемент є алгебраїчним поліномом [109, 120–129].

Сплайни дозволяють ефективно вирішувати практичні задачі обробки експериментальних даних, параметри яких мають складну структуру. Максимальна степінь використаних поліномів є степінню сплайну. У загальному випадку сплайн має вигляд [128]:

$$S(x) = \sum_{i=0}^n a_i^{(x)} \cdot \psi_i(x) + R(x) \quad (2.38)$$

де  $a_i^{(x)}$  – коефіцієнти функції, які залежать від значення вихідної функції  $f(x)$  у контрольних точках  $x_i$ ;

$\psi_i(x)$  – базисні функції сплайну;

$R(x)$  – регулюючі додаткові функції.

Беручи до уваги сучасні методи апроксимації інтерполяційними сплайнами, для обробки експериментальних даних при дослідженні системи рульового керування тролейбусу з використанням підсилювача рульового приводу на базі ДРК, у роботі використовується методи інтерполяції кубічними сплайнами. Важливим аспектом використання саме такого методу апроксимації є мінімізація феномену Рунге [128]. Для мінімізації максимальної різниці між табличними та розрахунковими значеннями функції у вузлах використовується метод Чебишева з визначенням критерію мінімізації різниці параметрів.

Кубічним сплайном на відрізку апроксимуючої функції називається подвійно безперервно диференційована функція  $y = f(x)$ , яка на кожному з відрізків  $\Delta_j = [x_{j-1}, x_j]$  співпадає з кубічним поліномом та задовольняє вимогам інтерполяції  $f(x_j) = y_j$ , при  $j = 1, \dots, N$  [128].

Многочлен Тейлора третього порядку в околицях точки  $x_j$  для кубічної сплайн-інтерполяції матиме вигляд:

$$S_j(x) = a_j + b_j \cdot (x_j - x_{j-1}) + c_j \cdot (x_j - x_{j-1})^2 + d_j \cdot (x_j - x_{j-1})^3 \quad (2.39)$$

де  $a_j, b_j, c_j, d_j$  – коефіцієнти поліному, які розраховуються на відрізку апроксимованої функції.

Використання кубічної апроксимації дозволяє будувати криві з безперервною не тільки першою, але і другою похідною [128].

Значний інтерес у даному дисертаційному дослідженні до методів кубічної сплайн-інтерполяції викликає можливість побудови двовимірних сплайнів. В даному випадку область визначення сплайну представляється у вигляді прямокутної сітки, вузли якої визначають контрольними точками. У цьому випадку побудова двовимірного сплайну виконується через добуток одновимірних сплайнів по кожній із змінних функції [128]:



$$S(x, y) = \sum_{i=0}^{n_x} \sum_{j=0}^{n_y} f(x_i, y_j) \cdot \psi_i^x(x) \cdot \psi_j^y(y) \quad (2.40)$$

Наведений вище метод апроксимації кубічними сплайнами дозволяє привести розрахункові дані до вигляду аналітичної функції.

Метод апроксимації кривих кубічними сплайнами дозволяє досягти мінімальної розбіжності отриманої аналітичної функції з розрахунковими даними та застосовується під час аналізу та обробки отриманих експериментальних або статистичних даних при розрахунку та описанні математичної моделі системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК.

#### 2.2.6 Математична модель магнітного поля ДРК.

Для створення неперервної математичної моделі магнітних та механічних характеристик ДРК проведено регресійний аналіз за допомогою методу апроксимації інтерполяційними кубічними сплайнами. Апроксимація поточкозчеплення полюсу, спираючись на рекомендації [120, 121], матиме наступний вигляд:

$$\Psi(i, \varphi) = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( a_{s,j-1}^{(i)} (i - i_{j-1})^s \cdot b_{k,j-1}^{(\varphi)} (q - q_{j-1})^k \right), \quad (2.41)$$

де  $a_{s,j-1}^{(i)}$  – коефіцієнт кубічного сплайну за степенню  $s$ , що апроксимує значення поточкозчеплення за струмом на відріжку  $[i - i_{j-1}]$ ;

$b_{k,j-1}^{(\varphi)}$  – коефіцієнт кубічного сплайну за степенню  $k$ , що апроксимує значення поточкозчеплення за кутом між мінімальним магнітним зазором та полюсом котушки статора на відріжку  $[q - q_{j-1}]$ ;

$i - i_{j-1}$  – вузли сплайн-інтерполяції, що обмежують відрізок який містить поточне значення струму  $i$ ;

$q-q_{j-1}$  – вузли сплайн-інтерполяції, що обмежують відрізок який містить поточне значення кута  $\varphi$ .

Оскільки кубічний сплайн представляє з себе подвійно безперервно диференційовану функцію аналітичне диференціювання по струму (2.41), дозволяє отримати диференціальну індуктивність:

$$L_{\partial} = \frac{\partial \Psi(i, \varphi)}{\partial i} = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( a_{s,j-1}^{(i)} \cdot s \cdot (i - i_{j-1})^{s-1} \cdot b_{k,j-1}^{(\varphi)} (q - q_{j-1})^k \right), \quad (2.42)$$

Аналітичне диференціювання за кутом між мінімальним магнітним зазором та полюсом котушки статора (2.41), дозволяє отримати коефіцієнт проти-ЕРС:

$$K_e = \frac{\partial \Psi(i, \varphi)}{\partial \varphi} = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( a_{s,j-1}^{(i)} (i - i_{j-1})^s \cdot b_{k,j-1}^{(\varphi)} \cdot k \cdot (q - q_{j-1})^{k-1} \right), \quad (2.43)$$

Електромагнітна сила, яка створюється полюсом, має аналогічний вид з (2.41), та визначається за виразом:

$$F_{mag}(i, \varphi) = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( c_{s,j-1}^{(i)} (i - i_{j-1})^s \cdot d_{k,j-1}^{(\varphi)} (q - q_{j-1})^k \right), \quad (2.44)$$

де  $c_{s,j-1}^{(i)}$  – коефіцієнт кубічного сплайну за степінню  $s$ , що апроксимує значення електромагнітної сили за струмом на відрізку  $[i - i_{j-1}]$ ;

$d_{k,j-1}^{(\varphi)}$  – коефіцієнт кубічного сплайну за степінню  $k$ , що апроксимує значення електромагнітної сили за кутом між мінімальним магнітним зазором та полюсом котушки статора на відрізку  $[q - q_{j-1}]$ ;

За результатами регресійного аналізу дискретних значень величин, отриманих під час моделювання магнітних характеристик двигуна та подальшої їхньої обробки (див. додаток Б), побудовані графіки залежностей

потокосцеплення  $\Psi$ , диференціальної індуктивності  $L_\phi$ , коефіцієнту проти-ЕРС  $K_e$ , електромагнітної сили полюсу  $F_{mag}$  та її складових  $F_x, F_y$  в залежності від струму у котушці полюсу та кута між мінімальним магнітним зазором та полюсом. Також, враховуючи (2.37), побудована характеристика електромагнітного моменту, який створюється полюсом ДРК.

Графіки залежностей представлені на рисунках 2.15–2.21.

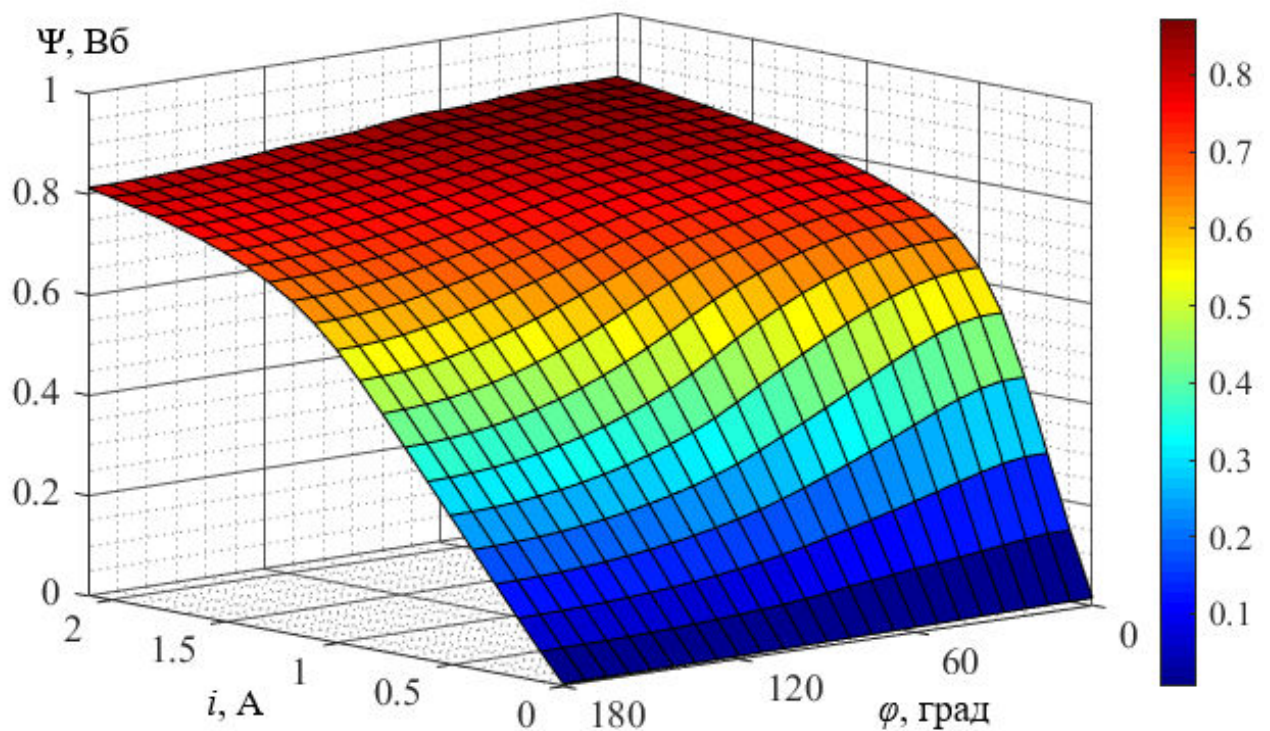


Рисунок 2.15 – Потокосцеплення котушки полюсу статора ДРК

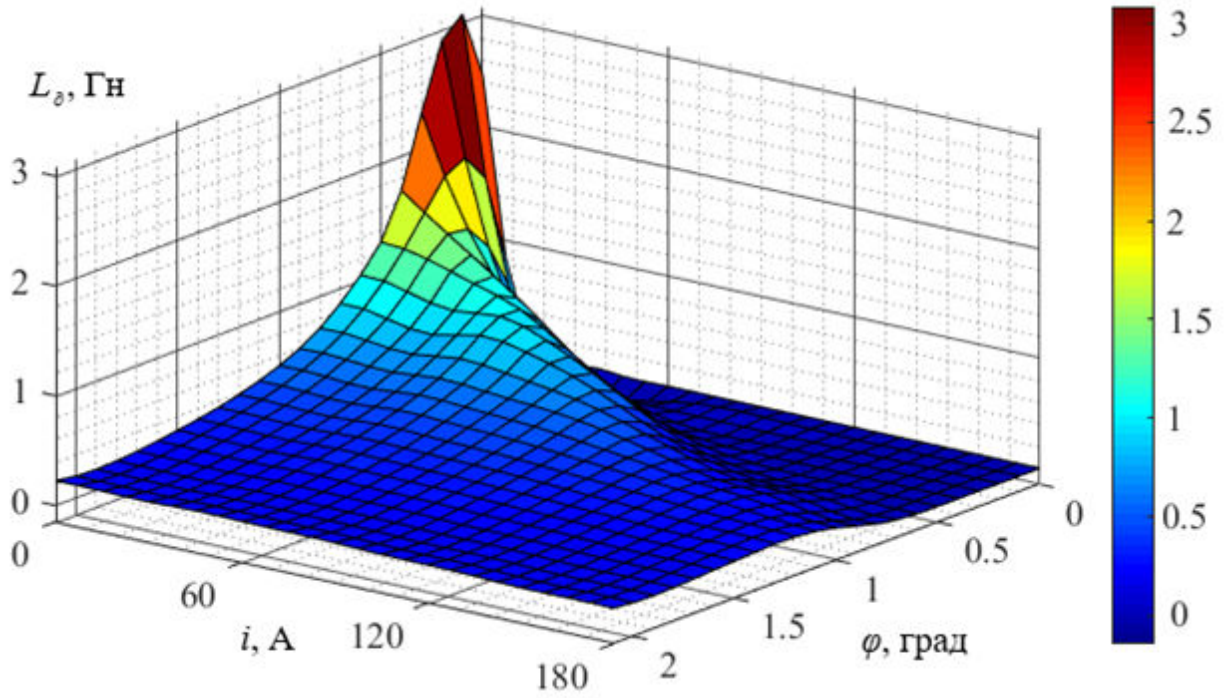


Рисунок 2.16 – Диференціальна індуктивність котушки полюсу статора ДРК

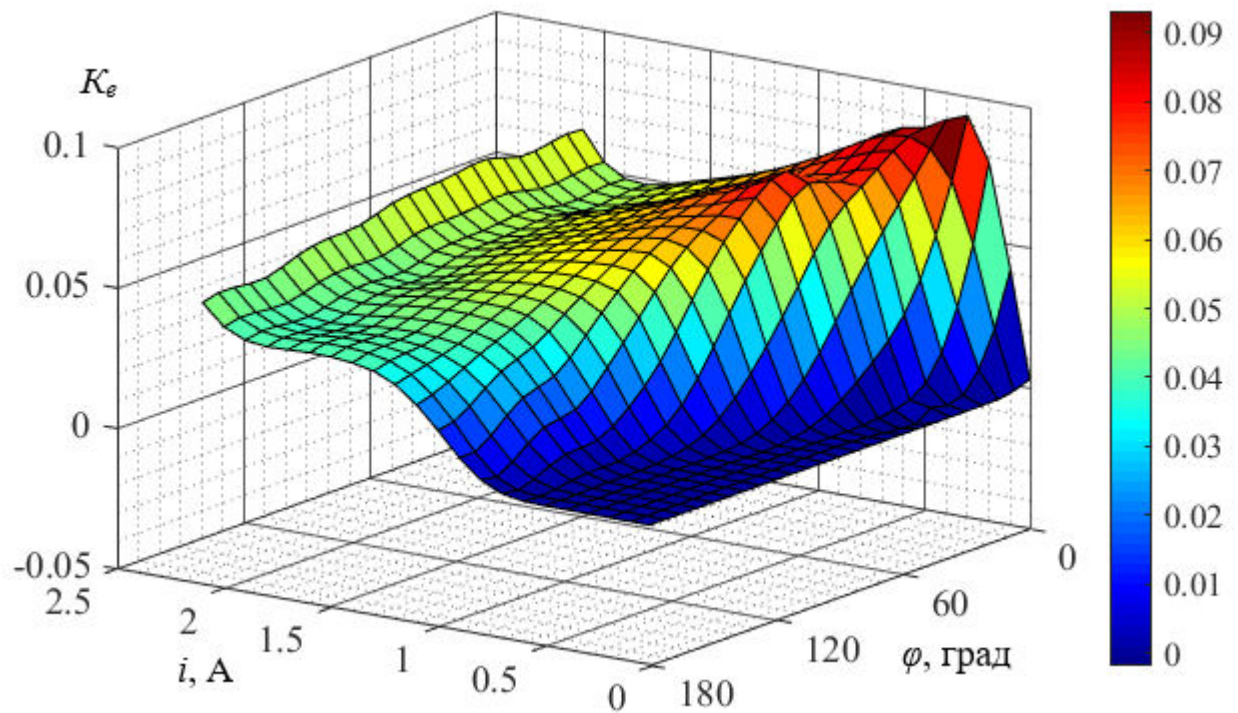


Рисунок 2.17 – Коефіцієнт проти-ЕРС котушки полюсу статора ДРК

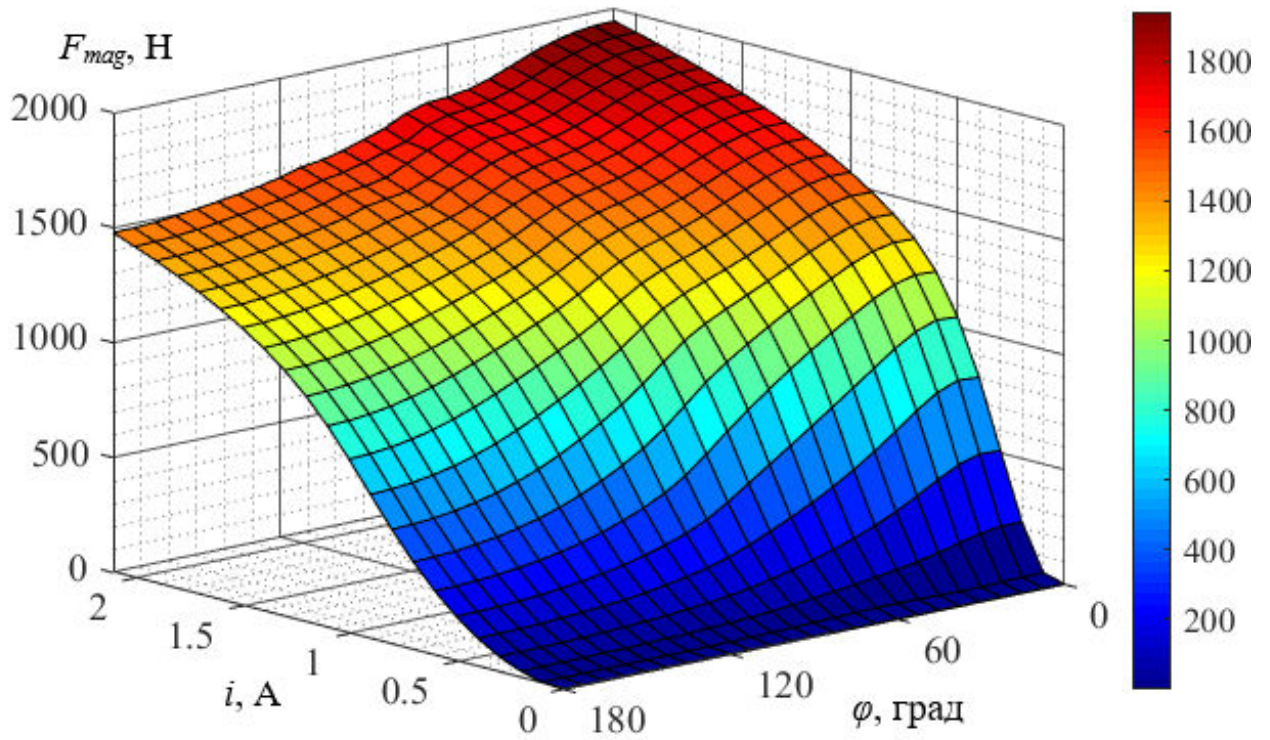


Рисунок 2.18 – Магнітна сила полюсу статора ДРК

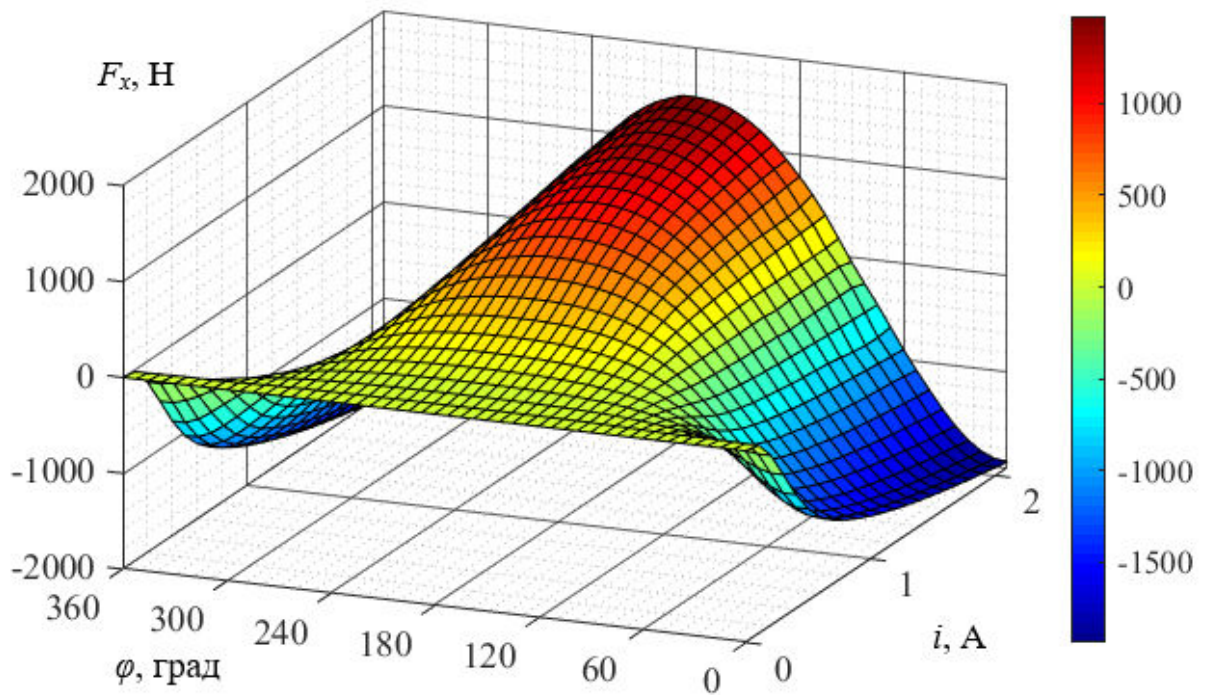


Рисунок 2.19 – Радіальна сила полюсу статора ДРК

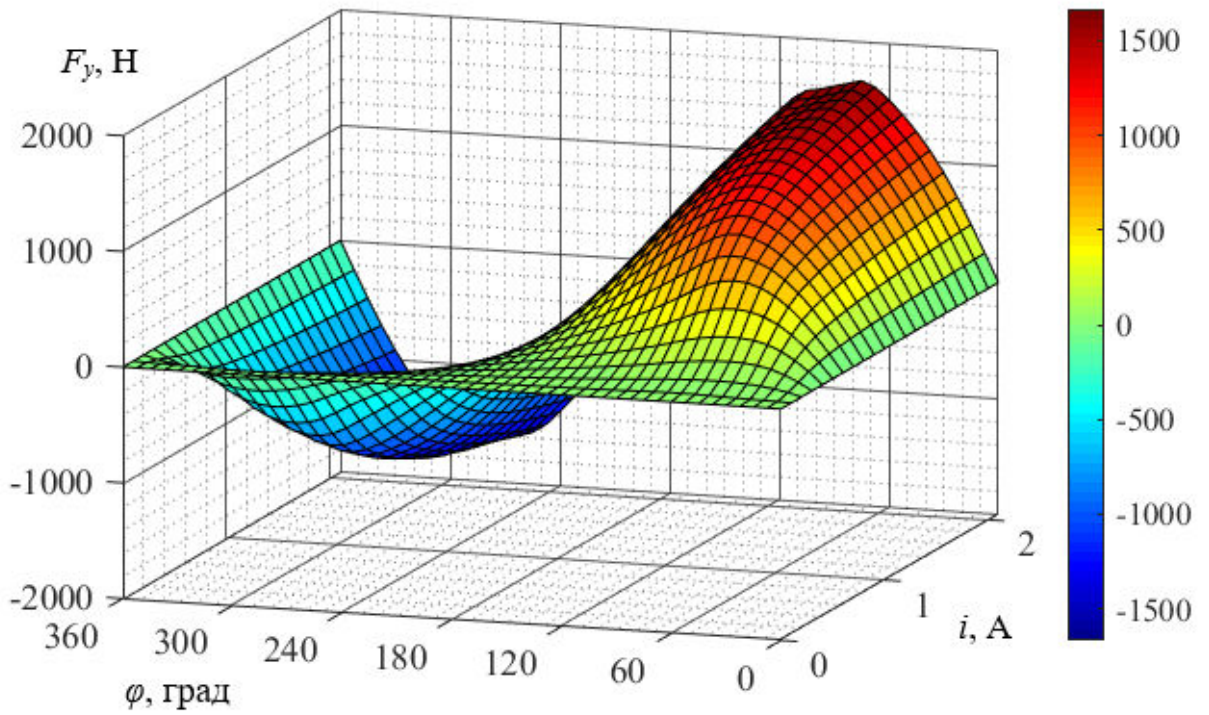


Рисунок 2.20 – Тангенціальна сила полюсу статора ДРК

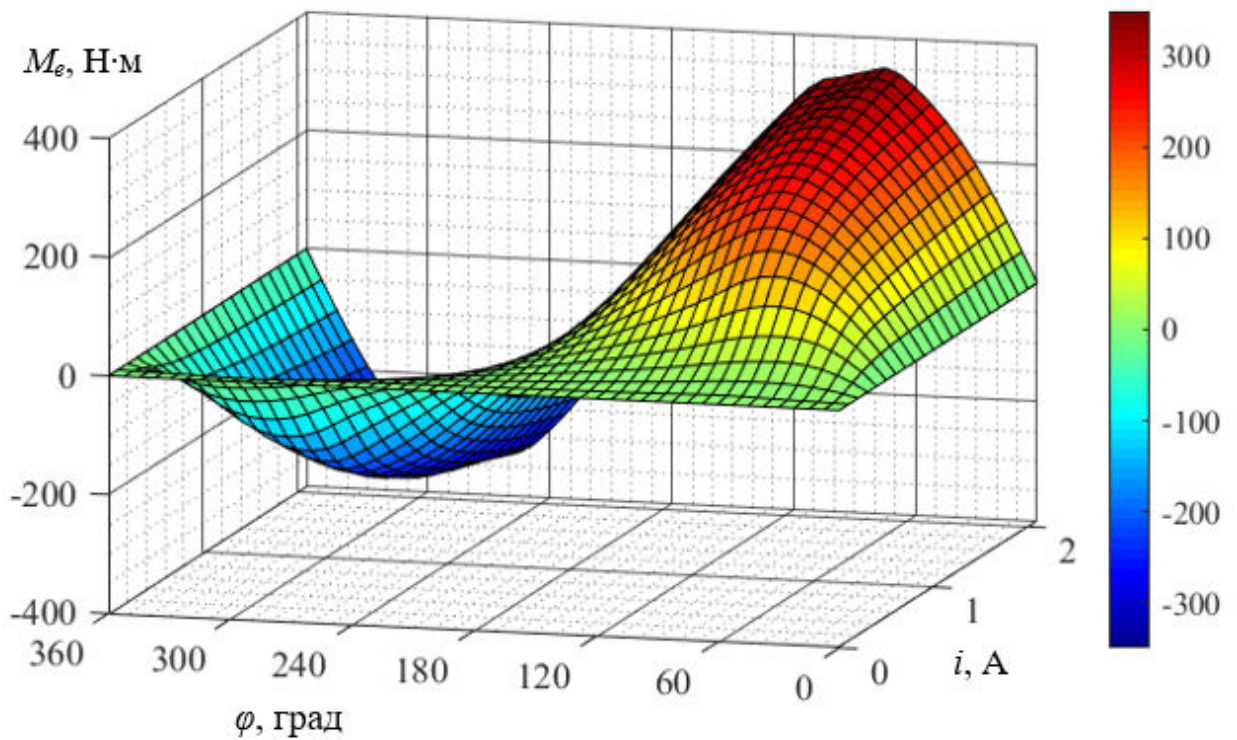


Рисунок 2.21 – Електромагнітний момент полюсу статора ДРК

Отримані аналітичні залежності (2.41) – (2.44) повною мірою описують поведінку магнітної системи високомоментного ДРК під час роботи.

Виходячи з аналізу характеристик (див. рис. 2.15–2.21) можна зробити висновок, що оптимальна комутація котушки ДРК має відбуватися з випередженням кута повороту між полюсом та мінімальним магнітним зазором. В такому випадку можливо досягти створення обертального моменту двигуна. Комутація котушки із запізненням призведе до створення полюсом гальмівного моменту, що загалом може бути використано для зменшення часу зупинки двигуна та його реверсу. Це особливо важливо в системі рульового керування тролейбусу у випадках динамічної зміни поведінки трафіку на дорогах, або наприклад забезпечення швидкодії підсилювача при об'їзді перешкод, тощо. При цьому відповідно до рисунку 2.19 можна побачити, що зі збільшенням випередження кута комутації котушки більше  $90^\circ$  значення радіальної сили змінює свій знак. Це свідчить про те, що при такій комутації тиск на опорну поверхню, який створюється даною силою зникає. В такому випадку ДРК може перейти у асинхронний режим роботи. Рух ротора при цьому характеризується обертанням з проковзуванням, що негативно позначається на динамічних властивостях, а також призводить до збільшеного зносу направляючих поверхонь.

У загальному випадку умова обертання ротора без проковзування визначається наступною залежністю [88]:

$$\mu_k (F_x + F_Z - F_G) \geq F_y . \quad (2.45)$$

де  $\mu_k$  – коефіцієнт тертя;

$F_Z, F_G$  – відповідно центробіжна сила та сила тяжіння, Н.

Створення номінального обертального моменту можливе у випадку одночасної комутації декількох котушок статора ДРК. При цьому для забезпечення рівномірного розподілу магнітного поля в осерді необхідно реалізовувати узгоджене ввімкнення котушок статора. Лише в такому випадку

можливо досягти рівномірного значення магнітної індукції в зазорі, від якого залежить обертальний момент двигуна.

Враховуючи необхідність одночасного узгодженого увімкнення декількох полюсів ДРК, а також їхню відносно велику кількість у роботі пропонується їх об'єднання у групи. В даному випадку, враховуючи кількість полюсів  $N_c = 48$  та результати дослідження [102], об'єднуємо котушки у групи по 6 паралельно з'єднаних котушок. Це в свою чергу призводить до економії комутаційних пристроїв (умовно утворюється восьмиполюсна електрична машина) у системі керування підсилювача рульового приводу.

2.2.7 Визначення оптимальної кількості зкомутованих котушок статора, які створюють номінальний обертальний момент.

Для визначення оптимальної кількості одночасно увімкнених полюсів ДРК у роботі проведено серію розрахунків у програмному комплексі FEMM. При цьому слід враховувати, що максимальне значення крутного моменту можливо досягти при увімкненні статорних котушок на проміжку  $\pm 90^\circ$  відносно точки мінімального магнітного зазору. На першому етапі розрахунку визначаються величини радіальної та тангенціальної сили, результуючий струм та загальна магнітна сила для групи з 6 паралельно увімкнених котушок на проміжку від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  зі зміною струму у кожній котушці від 0,1 А до 1,6 А. Наступними етапами є по чергове увімкнення додаткових груп по 6 паралельно увімкнених котушок на проміжку від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  з відповідною зміною струму. Таким чином проводиться розрахунок для однієї, двох, трьох та чотирьох одночасно увімкнених груп котушок. Результати розрахунку зведено у Додаток В.

За отриманими результатами відповідно до Додатку В побудовано сімейство характеристик тангенціальної, радіальної та загальної магнітної сили, що створюється ДРК відносно струму електричної машини. Дані характеристики представлені відповідно на рисунках 2.22–2.24.

Спираючись на рівняння визначення обертального моменту ДРК (2.37), а також умову обертання ротора без проковзування (2.45) можна зробити



висновок, що тангенціальній силі  $F_y$  відповідно до (2.37), яка утворюється при комутації 1-ї або 2-х одночасно увімкнених груп котушок недостатньо для створення номінального обертального моменту ДРК (див. рис. 2.22). Комутація 4-х одночасно увімкнених груп котушок статора (див. рис. 2.22) дозволяє реалізовувати обертальний момент у широкому діапазоні. Однак слід зазначити, що при цьому значно зменшується радіальна сила  $F_x$  ДРК (див. рис. 2.23). Це призводить до того, що тиск на опорну поверхню знижується й порушується умова обертання ротора без проковзування (2.45). У такому випадку значно підвищується знос опорної поверхні, що в свою чергу впливає на ресурс ДРК та його надійність. Одночасна комутація 3-х груп котушок дозволяє створювати достатній тиск на опорну поверхню, відповідно до (2.45). При цьому на більшій частині характеристики (див. рис. 2.22) графік тангенціальній силі ДРК при комутації 3-х груп котушок лежить вище по осі  $F_y$  за графік тангенціальній силі ДРК при комутації 4-х груп котушок. Це свідчить про те, що при однаковому струмі ДРК одночасна комутація 3-х груп котушок створює більший обертальний момент виходячи з (2.37).

Проведений аналіз отриманих характеристик дозволяє зробити висновок, що з точки зору найбільшої ефективності та утворення номінального обертального моменту, а також відповідно до описаних раніше вимог обертання ротора без проковзування, кількість з 3-х груп котушок, що одночасно комутуються, є оптимальною. В такому випадку досягається найбільша тангенціальна сила  $F_y$  для створення номінального обертального моменту ДРК при мінімальному споживанні електричної енергії

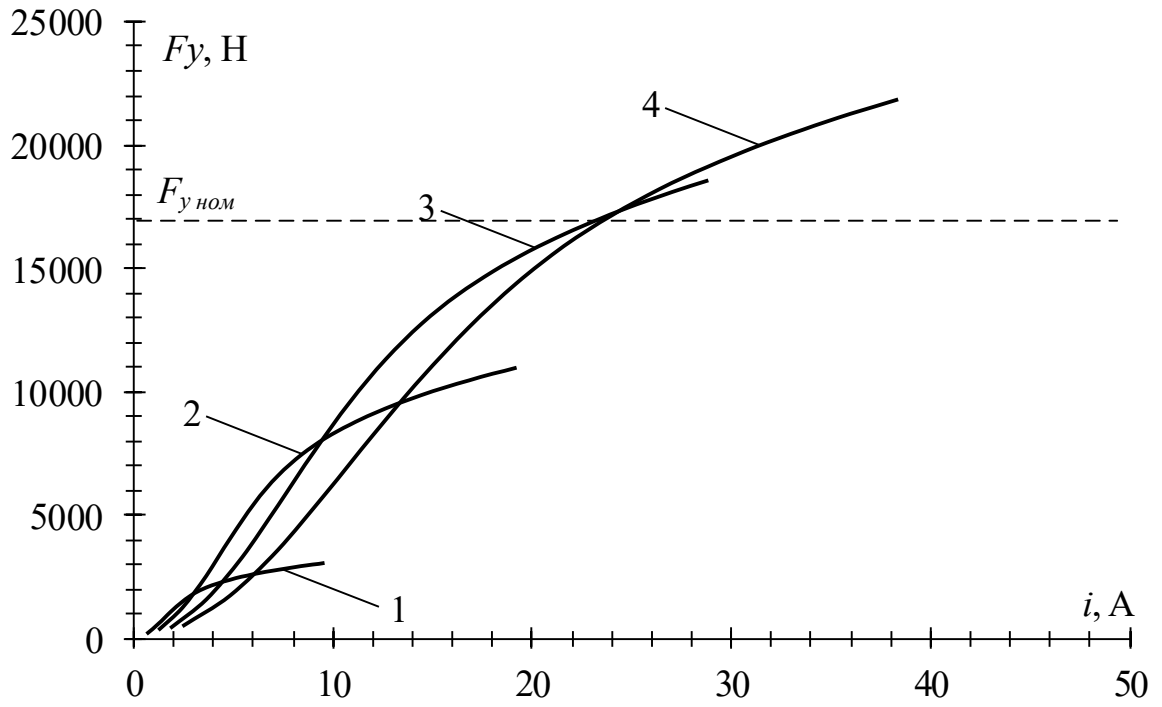


Рисунок 2.22 – Тангенціальна сила ДРК:

1, 2, 3, 4 – кількість одночасно увімкнених груп котушок статора;

$F_{y\text{ном}}$  – номінальна тангенціальна сила ДРК

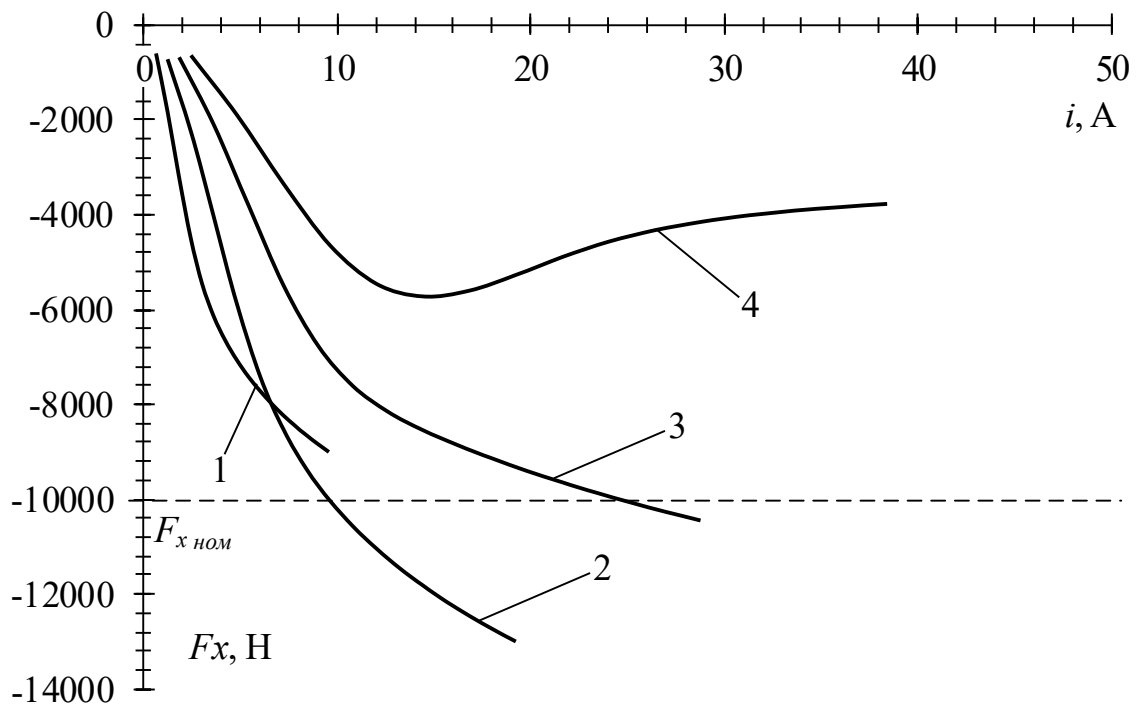


Рисунок 2.23 – Радіальна сила ДРК:

1, 2, 3, 4 – кількість одночасно увімкнених груп котушок статора;

$F_{x\text{ном}}$  – номінальна радіальна сила ДРК

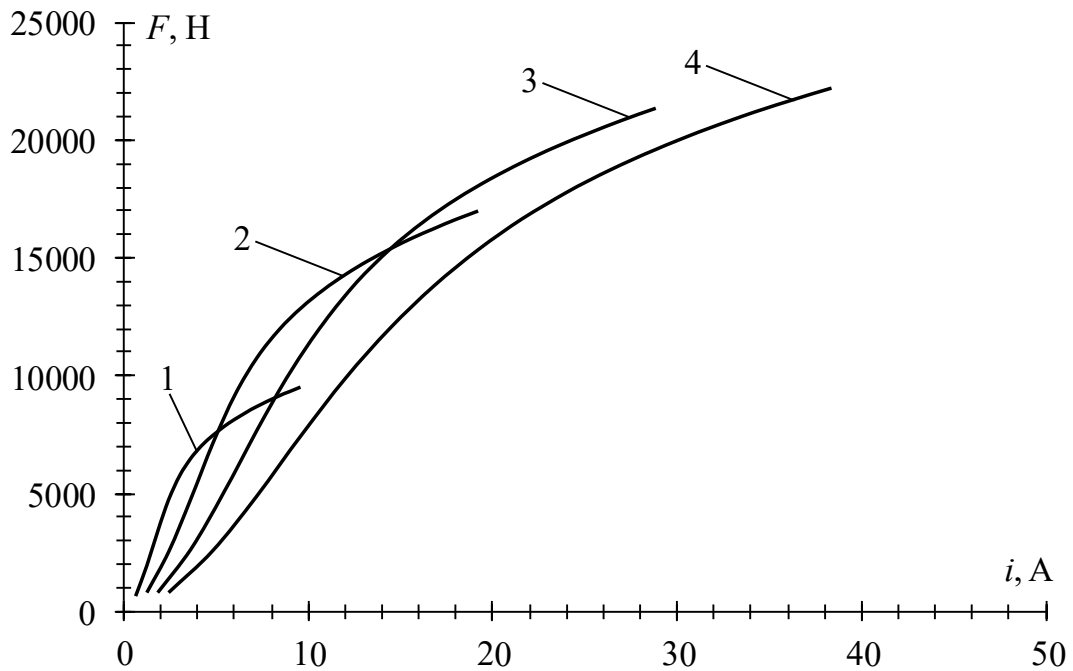


Рисунок 2.24 – Загальна магнітна сила ДРК:

1, 2, 3, 4 – кількість одночасно увімкнених груп котушок статора

Отримані результати дозволяють використовувати розрахований ДРК у системі рульового керування з кращою ефективністю, що напряму впливає на загальний ККД системи та застосовуються при подальшому математичному моделюванні.

### 2.3 Особливості конструкції системи рульового керування тролейбусу з використанням ДРК.

Визначивши характеристики предмету дослідження, де за основу взято систему рульового керування тролейбусу ЛАЗ-Е183D1, проведений розрахунок високомоментного електричного двигуна підсилювача РП, а також враховуючи вимоги до рульового керування тролейбусу [17] в рамках роботи розроблено та отримано від УКРПАТЕНТУ патент на корисну модель «Рульове керування тролейбусу з електромеханічним підсилювачем керма» [11].

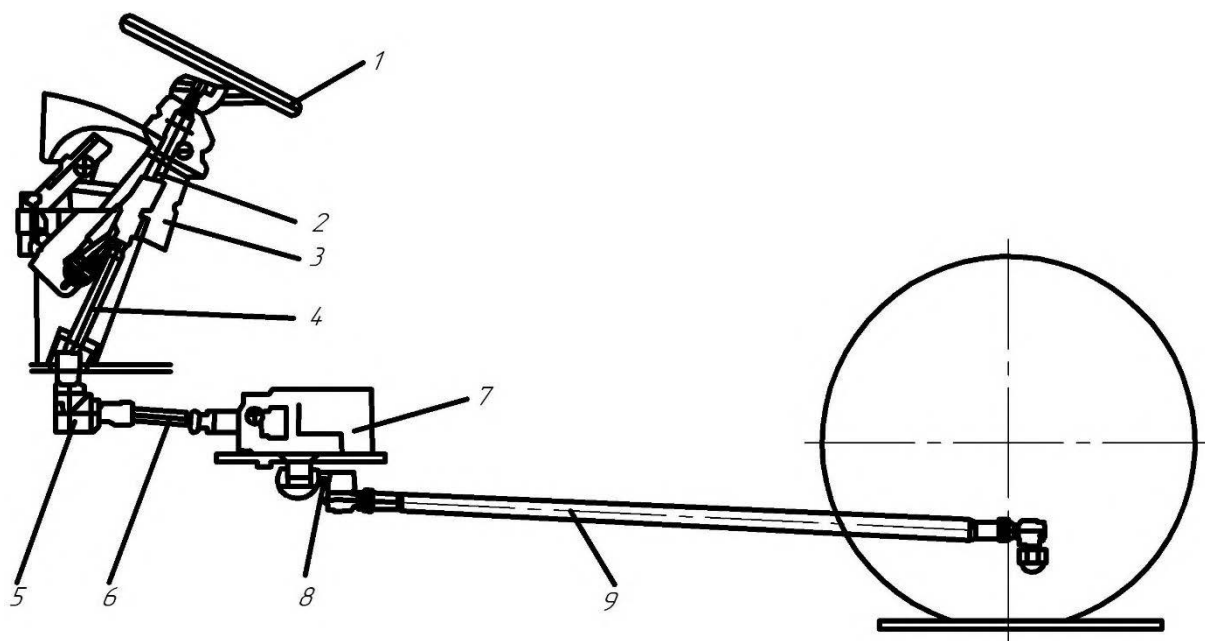
В основу корисної моделі поставлено завдання вдосконалення рульового керування з електромеханічним підсилювачем руля шляхом того, що як безконтактний багатополісний високомоментний двигун застосовано електродвигун з ротором, що котиться. Тим самим розширюються функціональні можливості рульового керування, реалізується високий момент на керованих колесах, зменшуються кількість вузлів підкузовного обладнання та знижуються енерговитрати [11].

Поставлене завдання досягається тим, що у рульовому керуванні з електромеханічним підсилювачем руля застосовується багатополісний тихохідний високомоментний двигун, електронний контролер, датчик моменту та датчик положення ротора, формувач керуючого впливу і група датчиків параметрів руху транспортного засобу.

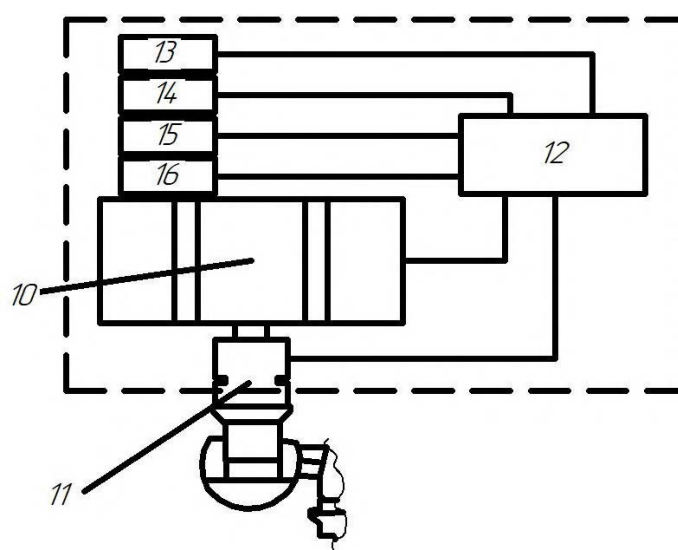
Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де зображено рульове керування з електромеханічним підсилювачем руля (див. рис. 2.25а), що містить рульове колесо 1, яке з'єднано з рульовою колонкою 2, кожух рульової колонки 3, карданний вал рульової колонки 4, кутовий редуктор 5, який передає момент на карданний вал рульового механізму 6, електричний підсилювач керма 7 (див. рис. 2.25б), який у свою чергу передає зусилля через сошку 8 на повздовжню тягу 9 рульової трапеції, електродвигун з ротором, що котиться 10, пристрій для вимірювання крутного моменту 11, цифрову систему керування 12, датчик повороту рульового колеса 13, датчик лінійної швидкості рухомого складу 14, датчик частоти обертання вихідного валу двигуна 15, датчик завантаження салону 16 [11].

Рульове керування з електромеханічним підсилювачем руля працює таким чином. Під час повороту рульового колеса 1, покази з датчика повороту рульового колеса 13 надходять до цифрової системи керування 12, яка відстежує покази датчиків швидкості рухомого складу 14, частоти обертання валу 15 електродвигуна з ротором, що котиться 10, датчика завантаження салону 16, формує керуючий вплив на електродвигун з ротором, що котиться 10, який передає крутний момент через сошку 8 на повздовжню тягу 9

рульового приводу, який передає зусилля для повороту керованих коліс тролейбусу [11].



a)



б)

Рисунок 2.25 – Рульове керування тролейбусу з електромеханічним підсилювачем керма [11]:

a – загальне креслення рульового керування; б – структурна схема електричного підсилювача керма з блоком керування

Запропонована корисна модель забезпечує розширення функціональних можливостей рульового керування та покращення його енергетичних характеристик.

Важливими елементами блоку системи керування електричного підсилювача рульового приводу є датчики крутного моменту та частоти обертання як рульового колеса так і електричного двигуна.

Також у дисертаційному дослідженні для контролю вихідних параметрів підсилювача рульового приводу пропонується датчик крутного моменту на який отримано від УКРПАТЕНТУ патент на корисну модель «Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнту корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту» [10].

Корисна модель відноситься до вимірювальної техніки та може бути використана для вимірювання крутного моменту, частоти обертання валу, механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна. Може активно застосовуватися у промислових системах та на транспорті, в системах діагностики електродвигунів та при проведенні наукових досліджень [10].

В основу корисної моделі поставлено завдання вдосконалення датчика крутного моменту шляхом того, що застосовано мікроконтролер, перший вхід якого підключений до частотоміра, другий вхід з'єднаний з виходом диференціального підсилювача через послідовно сполучені аналогово-цифровий перетворювач та амплітудний детектор, а третій вхід підключений до цифрового ватметра [10].

Суть корисної моделі пояснюється кресленням (див. рис. 2.26), де зображено пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту, що містить корпус 1, вхідний вал 2, вихідний знімний вал 3, між якими закріплена пружина 4, яка виконана у вигляді двох секцій, з'єднаних у центральній частині перемичкою, гвинтові доріжки 5, 6 з магнітними мітками з полярністю, що чергуються, нанесені відповідно на вхідний вал 2 та вихідний знімний вал 3, біля яких розташовані магнітомодуляційні головки 7, 8,

першими виводами з'єднані одна з іншою за диференціальною схемою, другі виводи магнітотуляційних головок 7, 8 підключені до диференціального підсилювача 9, а вихід магнітотуляційної головки 7, розташованої біля гвинтової доріжки вхідного валу 2, підключено через пороговий елемент 10 до частотоміра 11, а також містить амплітудний детектор 12, аналогово-цифровий перетворювач 13, цифровий ватметр 14 та мікроконтролер 15 [10].

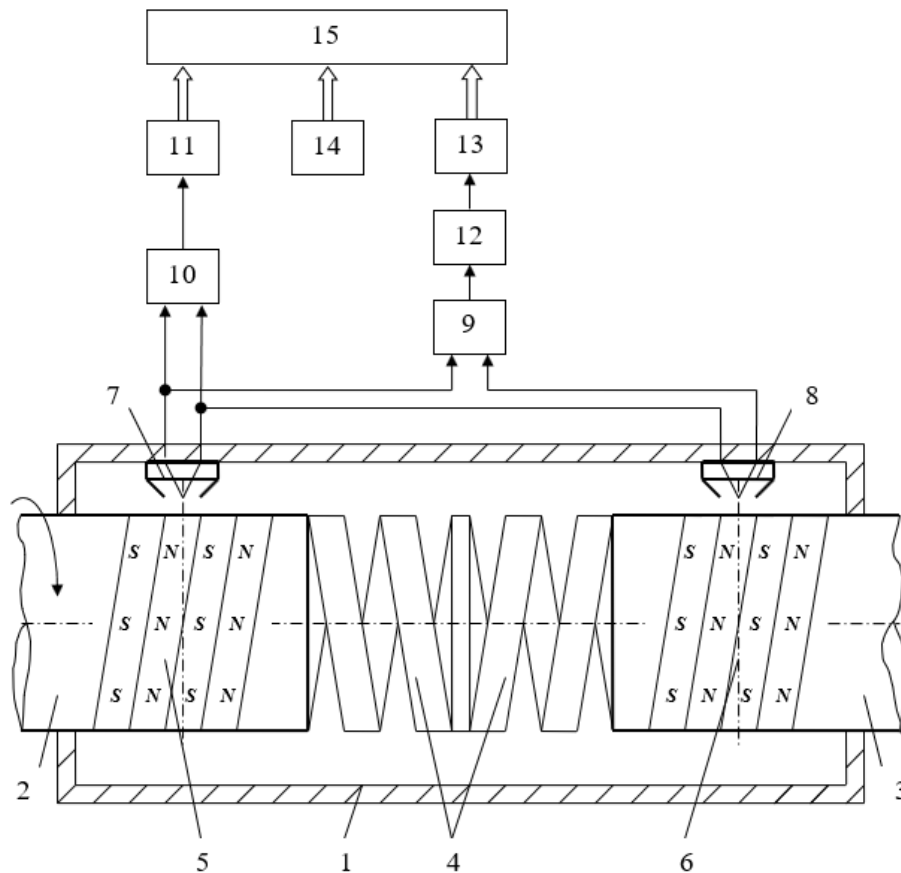


Рисунок 2.26 – Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту [10]

Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту працює таким чином. Попередньо на вхідний вал 2 та вихідний знімний вал 3 нанесено по дві гвинтові доріжки 5, 6 з магнітними мітками з полярністю, що чергується. При відсутності крутного моменту результуючий сигнал магнітотуляційних головок 7, 8, які вимірюють горизонтальні складові

напруженості магнітного поля міток, дорівнює нулю, тому сигнал на виході диференціального підсилювача 9 відсутній. При дії крутного моменту порушується баланс вихідних напруг магнітотуляційних головок 7, 8, у результаті чого величина та фаза сигналу на виході диференціального підсилювача 9 відповідають величині та знаку прикладеного моменту. Далі сигнал через амплітудний детектор 12 подається на аналогово-цифровий перетворювач 13. При обертанні вхідного 2 та вихідного знімного валів 2, 3 сигнал з виходу магнітотуляційної головки 7 одночасно подається на пороговий елемент 10, а потім - на частотомір 11, який реєструє частоту обертання вхідного валу 2. Сигнали з виходів частотоміра 11, аналогово-цифрового перетворювача 13 та цифрового ватметра 14 подаються на відповідно перший, другий та третій входи мікроконтролера 15. Оброблені за допомогою мікроконтролера дані передаються за допомогою інтерфейсу CAN або RS-485 до мікропроцесора системи керування, наприклад підсилювача рульового приводу тролейбуса [10].

Проведена робота над корисними моделями, визначені параметри механічної частини системи РП тролейбуса, а також визначені габаритні розміри ДРК підсилювача РП дозволяють запропонувати концепцію удосконалення системи рульового керування тролейбусу. Запропонована концепція дозволяє використовувати її не тільки на рухомому складі, який проектується, а й проводити модернізацію вже існуючого. Для візуального представлення поставленої задачі використовується програмний комплекс автоматизованої системи трьохвимірного моделювання у якому було розроблено трьохвимірну модель передньої підвіски, рульового механізму та рульового приводу тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 з елементами кріплення до несучої конструкції тролейбуса. Ізометрична проекція розробленої 3D-моделі зображена на рисунку 2.27.



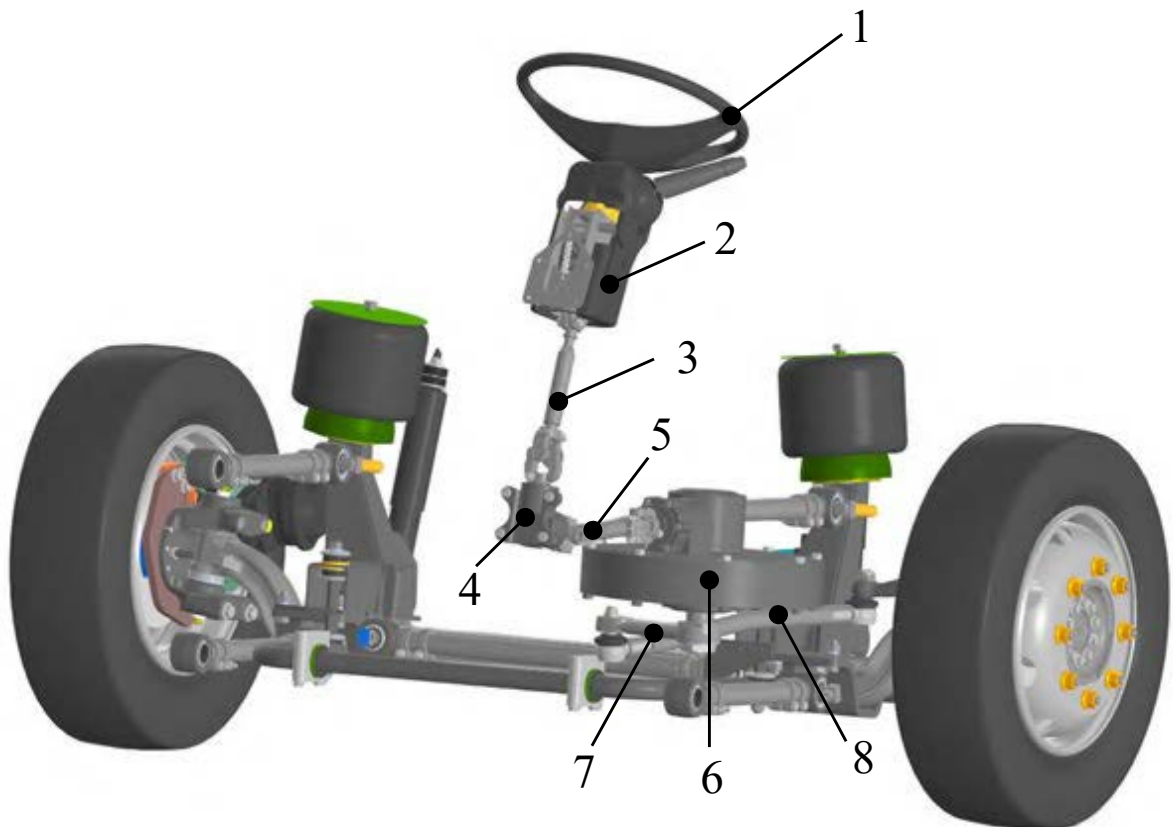
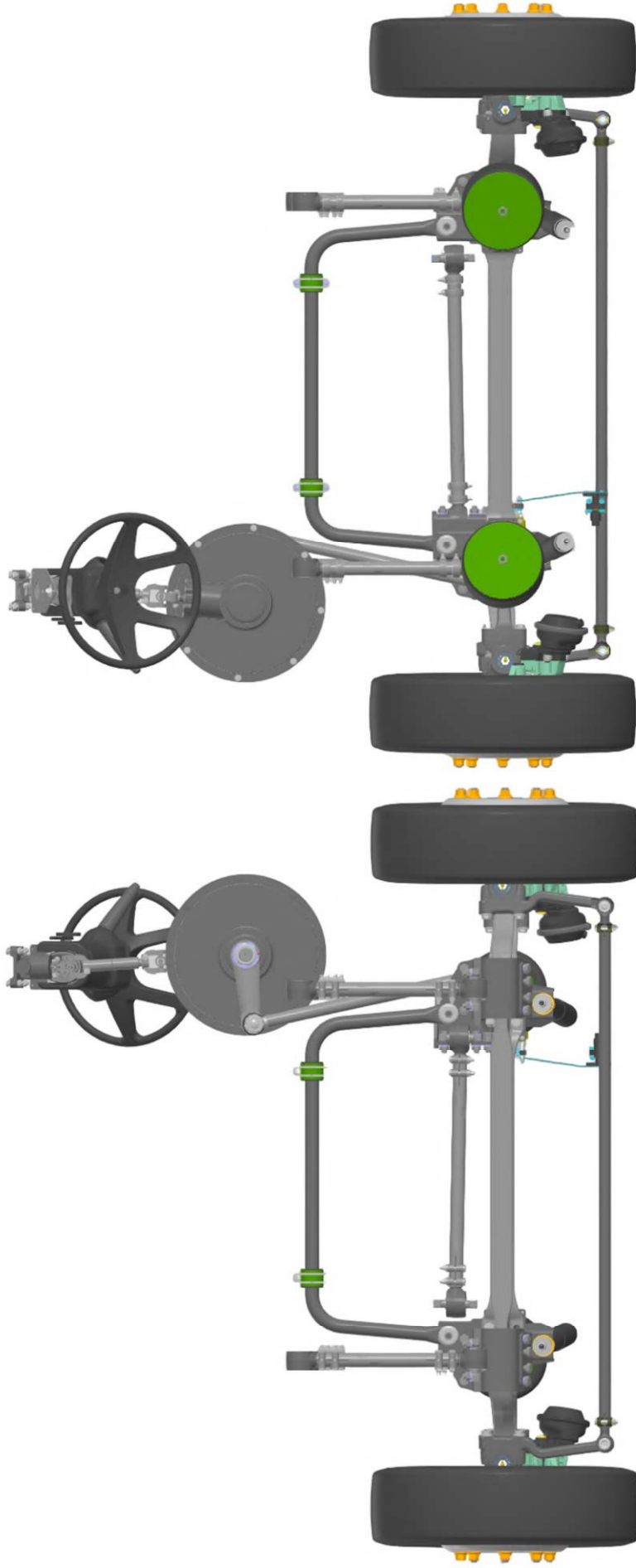


Рисунок 2.27 – Загальний вигляд системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК та елементами передньої підвіски тролейбуса.

На рисунку 2.27 цифрами позначено основні компоненти системи рульового керування: 1 – рульове колесо, 2 – рульова колонка, 3 – карданний вал рульової колонки, 4 – кутовий редуктор, 5 – карданний вал рульового механізму, 6 – електричний підсилювач рульового приводу з високомоментним ДРК, 7 – сошка рульового приводу, 8 – повздовжня тяга рульової трапеції.

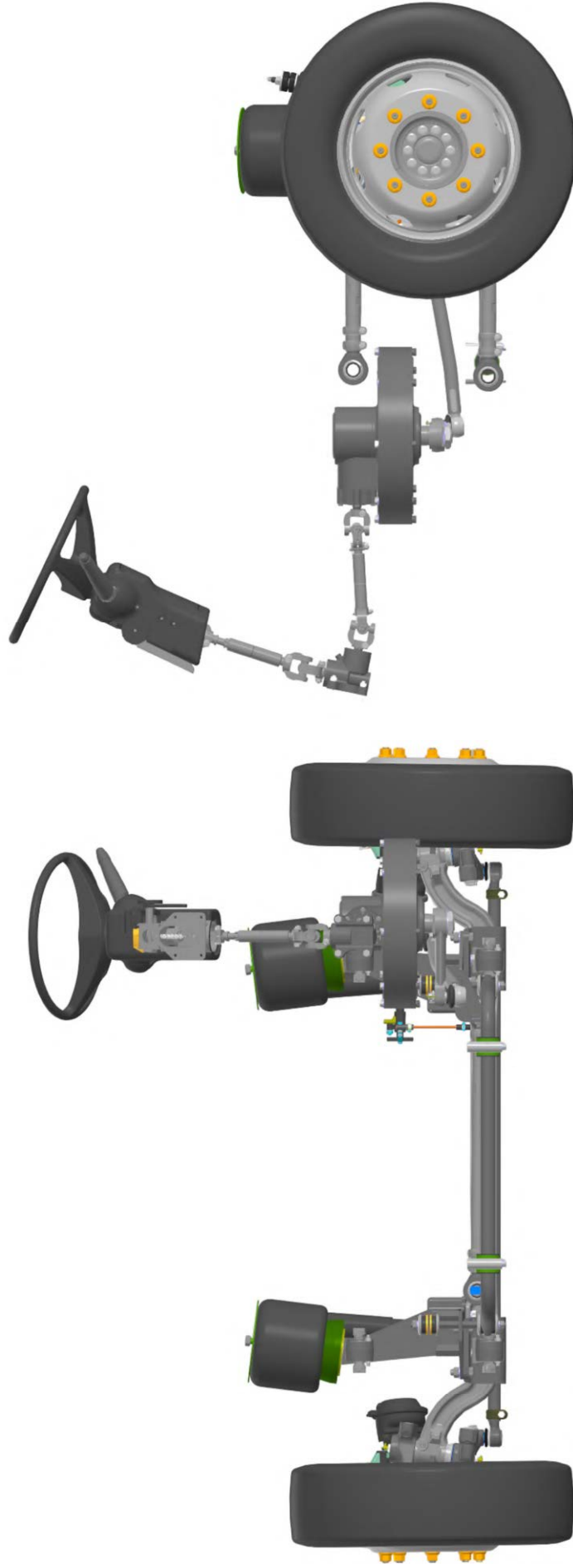
На рисунках 2.28 – 2.29 зображено проєкційні види запропонованої системи рульового керування з елементами передньої підвіски тролейбуса ЛАЗ-Е183D1 з різних ракурсів.



*a)*

*б)*

Рисунок 2.28 – Проекційні види системи рульового керування з елементами передньої підвіски тролейбуса:  
*a* – вид знизу; *б* – вид зверху.



*a)*

*б)*

Рисунок 2.29 – Проекційні види системи рульового керування з елементами передньої підвіски тролейбуса:  
*a* – вид спереду; *б* – вид збоку.

Перевагою запропонованого рішення є те, що воно дозволяє без суттєвих змін у конструкції рульового керування відомих тролейбусів проводити заміну стандартних кульковогвинтових гідروпідсилювачів типу ШВГУ-720 (та його аналогів). Запропонований електропідсилювач рульового приводу встановлюється на теж саме місце де має бути стандартний гідропідсилювач (див. рис. 2.30). Основні роботи при цьому можуть бути пов'язані з переробкою кріплень до рами тролейбусу.

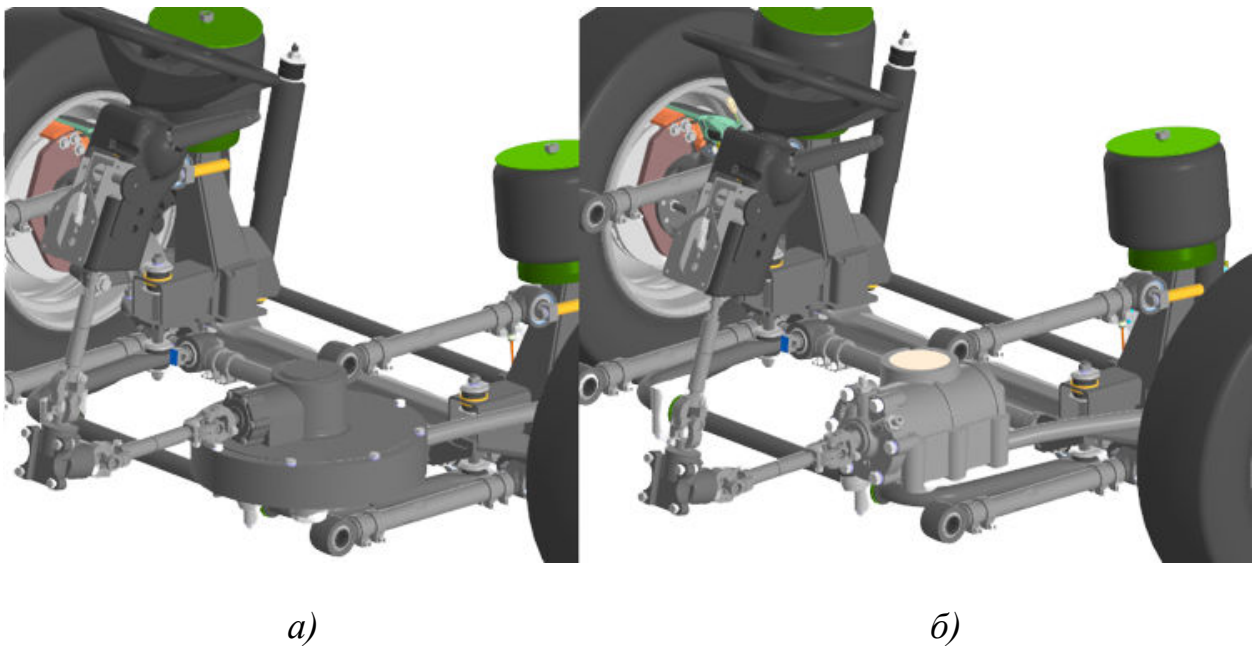


Рисунок 2.30 – Місце розташування підсилювачів РП:

*a* – електропідсилювача РП на базі ДРК; *б* – гідропідсилювача РП типу ШВГУ-720

При цьому з конструкції рульового керування зникає гідростанція, яка складається з гідронасоса, приводного електродвигуна, оливного бачка з фільтром і трубопроводів низького і високого тиску, що дозволяє покращити експлуатаційні характеристики ТЗ.

## Висновки за розділом 2

1. Визначено основні геометричні та масогабаритні параметри тролейбусу та підвіски його керованих коліс, які необхідні для розрахунку електричного підсилювача рульового приводу та дослідження системи рульового керування. У якості рухомого складу обрано модель тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 та його модифікації. Визначено момент опору повороту керованих коліс при максимально-допустимому навантаженні на керовану вісь тролейбусу, за яким розраховано необхідний момент ДРК, який складає близько  $M_{ДРК} = 4000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

2. За спрощеною методикою проведено розрахунок ДРК для підсилювача рульового приводу тролейбусу, за результатами якого визначені геометричні параметри магнітопроводу статора та ротора двигуна, ексцентриситет, номінальний електромагнітний момент, кількість полюсів, номінальний струм та кількість витків котушки полюсу, номінальну частоту обертання вихідного валу ротора двигуна.

3. Удосконалено метод визначення магнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться. Особливістю методу є розрахунок магнітного поля полюсів двигуна методом скінченних елементів в плоско-паралельній постановці задачі з подальшим проведенням регресійного аналізу та обчисленням потокозчеплення, диференціальної індуктивності, коефіцієнту проти-ЕРС, радіальної і тангенціальної складових магнітної сили.

4. За результатами моделювання магнітного поля визначено, що узгоджена комутація 3-х груп котушок (6 паралельно з'єднаних котушок у групі) дозволяє досягти значення сили магнітного тяжіння достатньої для створення номінального обертального моменту ДРК при мінімальному споживанні електричної енергії, що дозволяє підвищити загальний ККД системи рульового керування.

5. Запропоновано концепцію удосконалення системи рульового керування тролейбусу, де у якості підсилювача РП використовується

високомоментний ДРК. Виходячи з даної концепції розроблено та отримано патенти на корисну модель : «Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту» [10] та «Рульове керування тролейбусу з електромеханічним підсилювачем керма» [11]. Перевагою запропонованої концепції є те, що вона дозволяє без суттєвих змін у конструкції рульового керування відомих тролейбусів проводити модернізацію підсилювача рульового приводу з покращенням його експлуатаційних характеристик.

Ряд результатів дослідження представлених у розділі було опубліковано у наукових працях [2], [4], та патентах на корисну модель [10], [11].

## **РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ЕЛЕКТРОПІДСИЛЮВАЧЕМ РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ**

### **3.1 Методи математичного моделювання системи рульового керування троллейбусу**

Сучасні чисельні методи розв'язання систем нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь дозволяють проводити дослідження динамічних процесів складних електромеханічних систем. Впровадження універсальних інструментів моделювання при вирішенні задач синтезу та аналізу таких систем дозволили визначити етапи математичного моделювання [67–70, 72]:

- розробка математичної моделі системи що досліджується;
- вибір або розробка методу дослідження системи (чисельний, аналітичний, наближений);
- побудова імітаційної моделі, яка базується на визначених математичних залежностях, орієнтованої для вирішення поставлених задач в конкретному середовищі моделювання;
- постановка початкових та граничних умов моделювання;
- дослідження системи шляхом перевірки параметрів розробленої математичної моделі та отримання інформації про поведінку системи;
- аналіз отриманих даних з урахуванням критеріїв покращення властивостей та поведінки системи.

За основу принципів функціонування рульового керування троллейбусу та взаємодії елементів системи прийняті наступні фізичні закони:

- закон збереження енергії;
- закон збереження імпульсу;
- закони Кірхгофа;
- принцип Д'Аламбера;
- рівняння Лагранжа другого роду.

При формулюванні системи рівнянь математичної моделі рульового керування тролейбусу необхідно визначитися з початковими, граничними та іншими умовами. Це необхідно для того, щоб система рівнянь моделі мала однозначне єдине рішення.

При цьому необхідною умовою є виділення законів, які корінним чином впливають на поведінку системи, що досліджується. Деякі вторинні фактори необхідно приймати на рівні припущення аби не ускладнювати математичну модель без необхідності.

В цілому схему побудови математичної моделі будь-якого елемента електромеханічної системи рульового керування тролейбусу представлено у вигляді схеми, зображеної на рисунку 3.1.

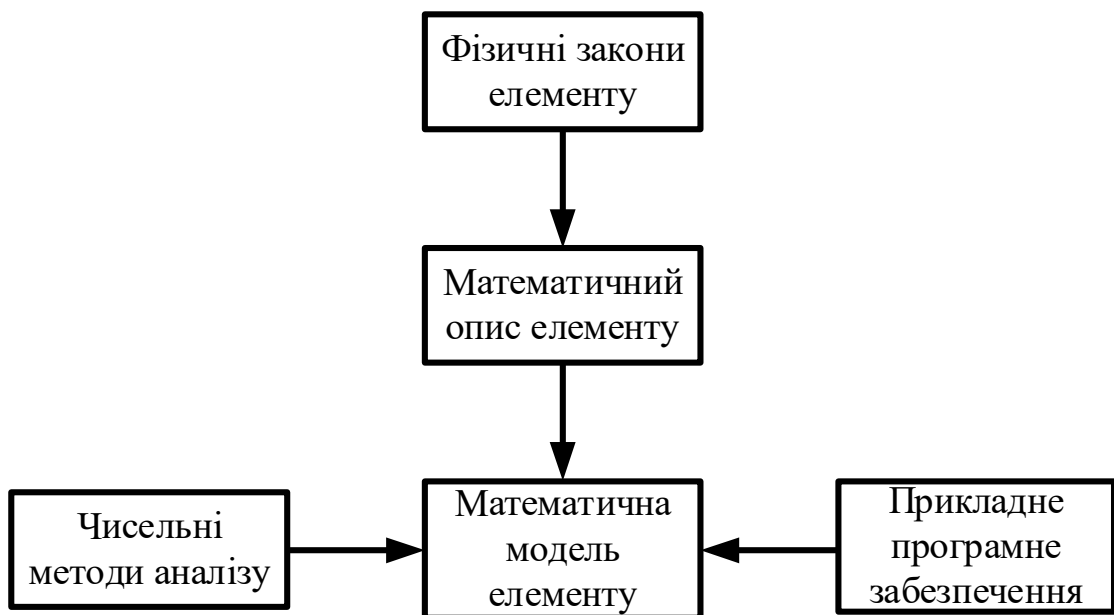


Рисунок 3.1 – Загальна схема побудови математичної моделі елемента електромеханічної системи

Така послідовність побудови математичної моделі дозволяє описати поведінку елементів електромеханічної системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК з притаманними їй властивостями та характером перехідних процесів.



### 3.2 Розробка структурної схеми рульового керування з електропідсилювачем на базі двигуна з ротором що котиться

Система рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу представляє собою складний електромеханічний комплекс. Фізичні процеси, які відбуваються у кожному складовому елементі системи, впливають на поведінку роботи рульового керування загалом.

У роботі запропоновано використовувати електричний двигун з ротором що котиться, який виконує роль підсилювача рульового приводу. Даний тип двигуна має певні конструктивні особливості, що кардинально відрізняють його від загальноприйнятих електричних машин, які використовуються у різноманітних галузях техніки.

Особливості конструкції електричних двигунів з ротором що котиться дозволяють використовувати їх у складі безредукторних систем електроприводу.

Спираючись на методи математичного та імітаційного моделювання розглянуті у [130–138], визначені параметри об'єкту дослідження та проведені розрахунки у другому розділі дисертації, розроблені корисні моделі та аналіз літературних джерел [72,120,139], враховуючи особливості конструктивних елементів визначено, що система рульового керування тролейбусу з електропідсилювачем рульового приводу складається з підсистем, які можна розділити за функціональним призначенням. Для розгляду особливостей роботи систем та підсистем рульового керування створена структурна схема системи рульового керування тролейбусу з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться (див. рис. 3.2).

Система керування СК, працюючи від напруги джерела живлення  $U_{дж}$ , проводить моніторинг показань величин з датчиків швидкості руху транспортного засобу  $v_{ТЗ}$ , наповненості салону  $G_{ТЗ}$ , кутової швидкості  $\omega_{ДРК}$  обертання ДРК, струмів фаз  $i_{ДРК}$  ДРК, моменту  $M_{РК}$ , прикладеного до

рульового колеса, частоти обертання рульового колеса  $\omega_{PK}$ , кута повороту керованих коліс  $\theta_{KK}$ . Контроль величин відбувається у режимі реального часу.

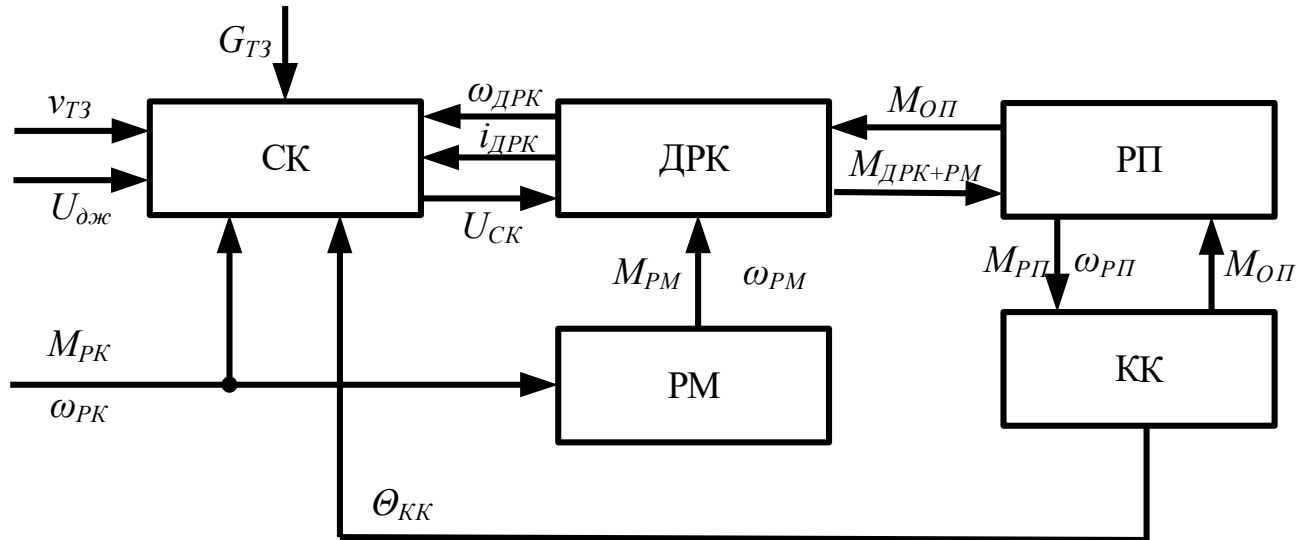


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи рульового керування тролейбусу з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться: СК – системи керування електричним підсилювачем; ДРК – двигун з ротором що котиться; РП – рульовий привод; РМ – рульовий механізм; КК – керовані колеса

Під час аналізу показань датчиків, система керування СК формує напругу  $U_{СК}$  для живлення ДРК за заданим законом керування. Електричний двигун ДРК механічно пов'язаний з рульовим приводом РП та рульовим механізмом РМ. Під час роботи електропідсилювача системи рульового керування момент від обертання рульового колеса, що прикладений водієм, трансформуються через передаточне відношення РМ та складається з моментом ДРК. Відповідно, результуючий момент  $M_{ДРК+РМ}$  передається на РП і долаючи момент опору  $M_{ОП}$ , відбувається поворот керованих коліс КК.

Таким чином, відповідно структурної схеми (див. рис. 3.2) очевидно, що систему рульового керування з електропідсилювачем на базі ДРК можна умовно розділити на дві підсистеми – електричну та механічну. Умовність такого поділу полягає в у тому, що власне електричний двигун з ротором що котиться представляє з себе електромеханічний перетворювач енергії. Такий поділ допомагає краще визначитися з методологією та послідовністю створення математичної моделі системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК.

### 3.3 Математична модель підсилювача рульового приводу тролейбусу.

#### 3.3.1 Механічні перетворення енергії ДРК.

Ексцентричне розташування ротора відносно статора є ключовою особливістю ДРК. Під час роботи ДРК, виникаюче зміщення осі симетрії ротора відносно статора створює між ними контакт. Зважаючи на це, рух ротора по поверхні статора є складним видом руху. Такий рух представляє суперпозицію обертального та поступального видів руху. Обертальний рух відбувається відносно осі симетрії ротора. Поступальний рух характеризується рухом центра мас ротора по певній траєкторії. Загалом ці два види руху характеризуються рівнянням кінетичної енергії [69, 88]:

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (3.1)$$

де  $v$  – швидкість руху по траєкторії, м/с;

$\omega$  – кутова швидкість обертання, рад/с;

$J$  – момент інерції, кг·м<sup>2</sup>;

$m$  – маса ротора, кг.

Під час роботи ДРК на ротор впливають магнітні та механічні сили, які викликають його поступальний та обертальний рух. Ці сили впливають на

величину обертового моменту ДРК. Розподіл сил залежить від просторового положення ДРК. Вплив магнітних й механічних сил на ротор, де вісь обертання ротора паралельна горизонтальній площині, представлено на рисунку 3.3.

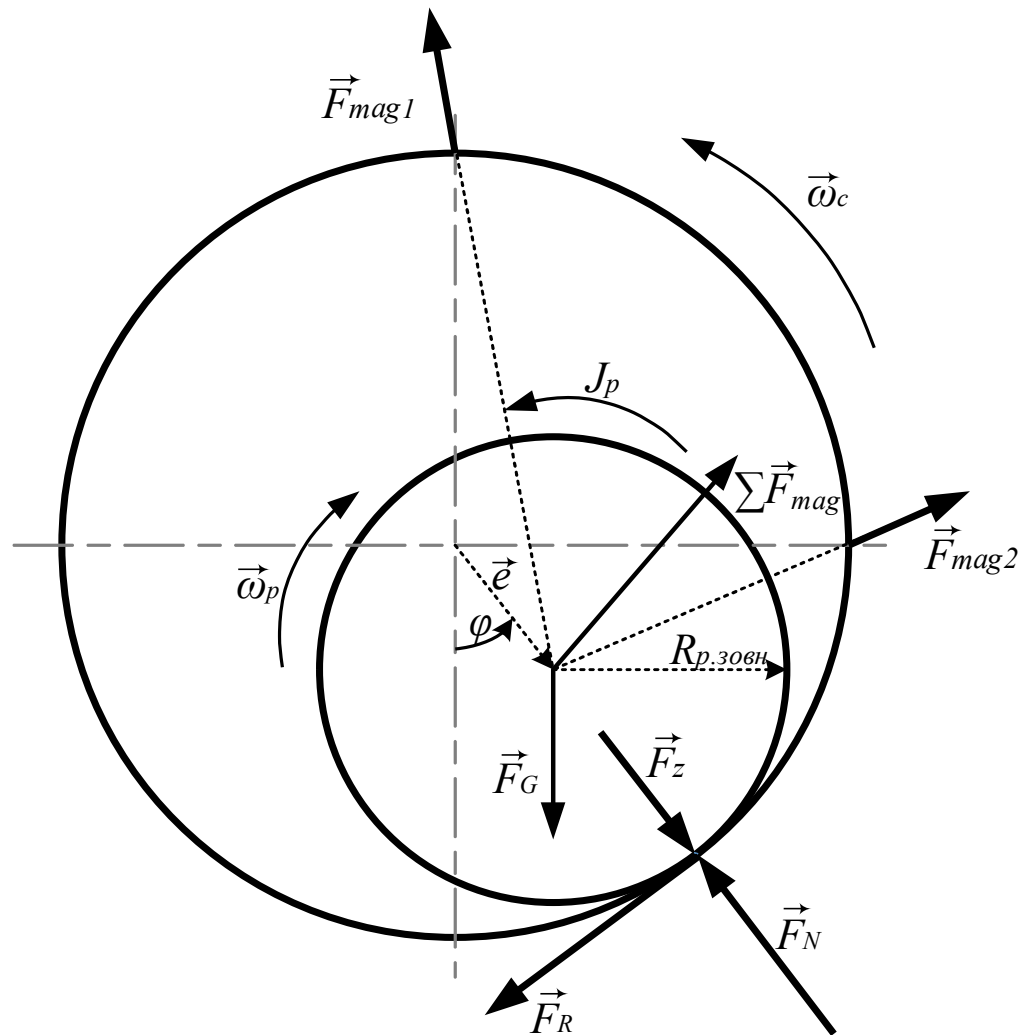


Рисунок 3.3 – Розподіл магнітних та механічних сил на ротор при осі його обертання паралельній горизонтальній площині [69]:  $\omega_p$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\omega_c$  – кутова швидкість обертання поля статора;  $R_{p.зовн}$  – зовнішній радіус ротора;  $J_p$  – момент інерції ротора;  $F_N$  – сила нормальної реакції опори;  $F_Z$  – центробіжна сила;  $F_R$  – сила тертя;  $F_G$  – вага ротора;  $F_{mag}$  – магнітна сила, яка створюється полюсом статора;  $e$  – ексцентриситет ротора

Магнітна сила викликана магнітним полем, яке створюється зкомутованими котушками полюсів ДРК  $F_{mag}$  утворює певний кут  $\alpha$  у кожний момент часу обертання осі ротора, яка проходить через центр системи з мінімальним магнітним зазором (точка контакту) (див. рис. 3.4) [88–90]. Така сила має дві складові  $F_x$  та  $F_y$ . Радіальна сила  $F_x$  визначає електромагнітний тиск на опорну поверхню та складається з вектором центробіжної сили  $F_z$ . Тангенціальна сила  $F_y$  бере участь у створенні електромагнітного обертального моменту [52, 69, 88].

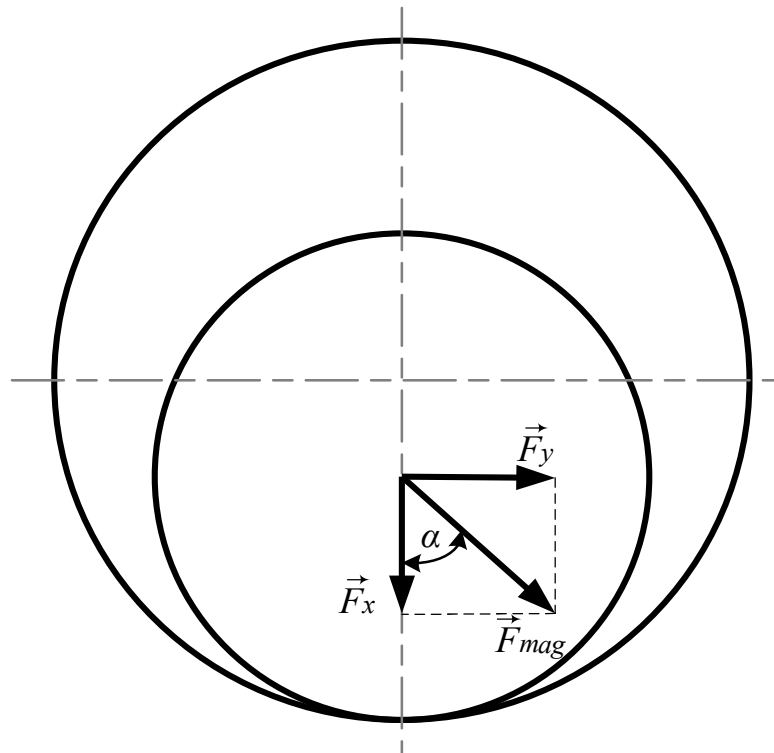


Рисунок 3.4 – Складові вектору магнітної сили

Електромагнітна сила, яка створюється кожним полюсом статора ДРК визначається за виразом (2.34). Радіальна та тангенціальна сили кожного полюсу визначаються за виразами (2.35) та (2.36).

У сторону мінімального повітряного зазору діють центробіжна сила (3.2) та змінна складова сили ваги (3.3) [69, 88].

$$F_Z = m_p \omega_c^2 e, \quad (3.2)$$

$$F_G = m_p g, \quad (3.3)$$

де  $m_p$  – маса ротора, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

$e$  – ексцентриситет ротора, м;

Сила нормальної реакції опори у такому випадку визначається за виразом [69, 88]:

$$F_N = F_Z + F_G \cos(\varphi) + \sum F_{xn}, \quad (3.4)$$

$F_{xn}$  – радіальна сила  $n$ -го полюсу, Н;

Сила тертя визначається за виразом:

$$F_R = \mu_k F_N, \quad (3.5)$$

де  $\mu_k$  – коефіцієнт тертя.

В результаті загальна сила одностороннього магнітного тяжіння, яка створює обертальний момент визначається за виразом [69, 88]:

$$F_{ДПК} = -F_G \sin(\varphi) - F_R + \sum F_{yn}, \quad (3.6)$$

$F_{yn}$  – тангенціальна сила  $n$ -го полюсу, Н;

Механічні процеси ДПК, які викликані обертальним рухом представлено у вигляді одномасової системи та визначаються за виразом:

$$J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_{ДПК} - M_{он}, \quad (3.7)$$

де  $J_p$  – приведений момент інерції до валу ротора, кг·м<sup>2</sup>;

$M_{ДРК}$  – момент на валу двигуна ДРК, Н·м;

$M_{оп}$  – момент опору, Н·м.

Електромагнітний момент створений на валу ДРК визначається за виразом [69]:

$$M_{ДРК} = F_{ДРК} \cdot R_{р.зовн.} \quad (3.8)$$

### 3.3.2 Електромагнітні перетворення енергії ДРК

Електромагнітні процеси та їх взаємодія, які відбуваються під час роботи ДРК, визначаються рівняннями Максвела (2.11) – (2.14). На розподілення силових ліній магнітного поля впливає рух ротора. Це означає, що магнітне поле залежить не тільки від струму в котушках полюсів, а й від положення ротора.

Математична модель ґрунтуються на фізичних особливостях взаємодії електромагнітних процесів, які відбуваються у кожній котушці ДРК. Тому для характеристики впливу взаємодії створена схема заміщення кожної котушки ДРК (рис. 3.5).

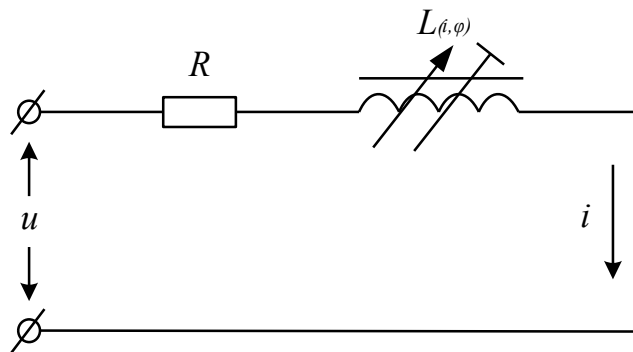


Рисунок 3.5 – Електрична схема заміщення котушки статора ДРК:

$u$  – напруга прикладена до фази статора;  $R$  – активний опір котушки статора;

$L_{(i,\varphi)}$  – індуктивність котушки статора;  $i$  – струм котушки статора.

Схема заміщення кожної котушки (див. рис. 3.7) описується диференціальним рівнянням [98, 99]:

$$u_n = i_n R_n + \frac{d\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{dt} \quad (3.9)$$

де  $u_n$  – напруга прикладена до  $n$ -ї котушки статора, В;

$i_n$  – струм  $n$ -ї котушки статора, А;

$\varphi_n$  – геометричний кут між полюсом та точкою мінімального магнітного зазору, град;

$\Psi_n(i_n, \varphi_n)$  – потокозчеплення  $n$ -го полюсу, Вб;

Зміна магнітного поля у часі для кожного полюсу визначається за виразом :

$$\frac{d\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{dt} = \frac{\partial\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{\partial i_n} \frac{di_n}{dt} + \frac{\partial\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{\partial \varphi_n} \frac{d\varphi_n}{dt}, \quad (3.10)$$

Складові виразу (3.10) представимо у вигляді:

$$L_{\partial n} = \frac{\partial\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{\partial i_n} \quad (3.11)$$

$$K_{en} = \frac{\partial\Psi_n(i_n, \varphi_n)}{\partial \varphi_n} \quad (3.12)$$

де  $L_{\partial n}$  – диференціальна індуктивність  $n$ -го полюсу статора;

$K_{en}$  – коефіцієнт проти-ЕРС  $n$ -го полюсу статора.

Враховуючи рівняння (3.10) – (3.12) остаточне рівняння електричного кола ДРК, приймає наступний вигляд:

$$u_n = i_n R_n + \frac{di_n}{dt} \cdot L_{\partial n} + K_{en} \cdot \omega_p, \quad (3.13)$$

де  $\omega_p = \frac{d\varphi}{dt}$  – кутова швидкість обертання ротора, рад/с.



### 3.4 Математична модель механічної частини рульового приводу тролейбусу.

Відповідність щодо вимог безпеки, комфорту, ефективності та надійності, експлуатаційних характеристик вузлів і агрегатів тролейбусу виражена у певних особливостях взаємодії його конструктивних елементів.

Кінематика повороту керованих коліс тролейбуса (рис. 3.6) під час руху проектується таким чином, щоб не допустити бокового проковзування коліс по дорожньому покриттю. Зовнішнє та внутрішнє колесо під час повороту описують певну дугу відносно миттєвого центру повороту, але різного радіусу, тобто повертаються на різні кути [139].

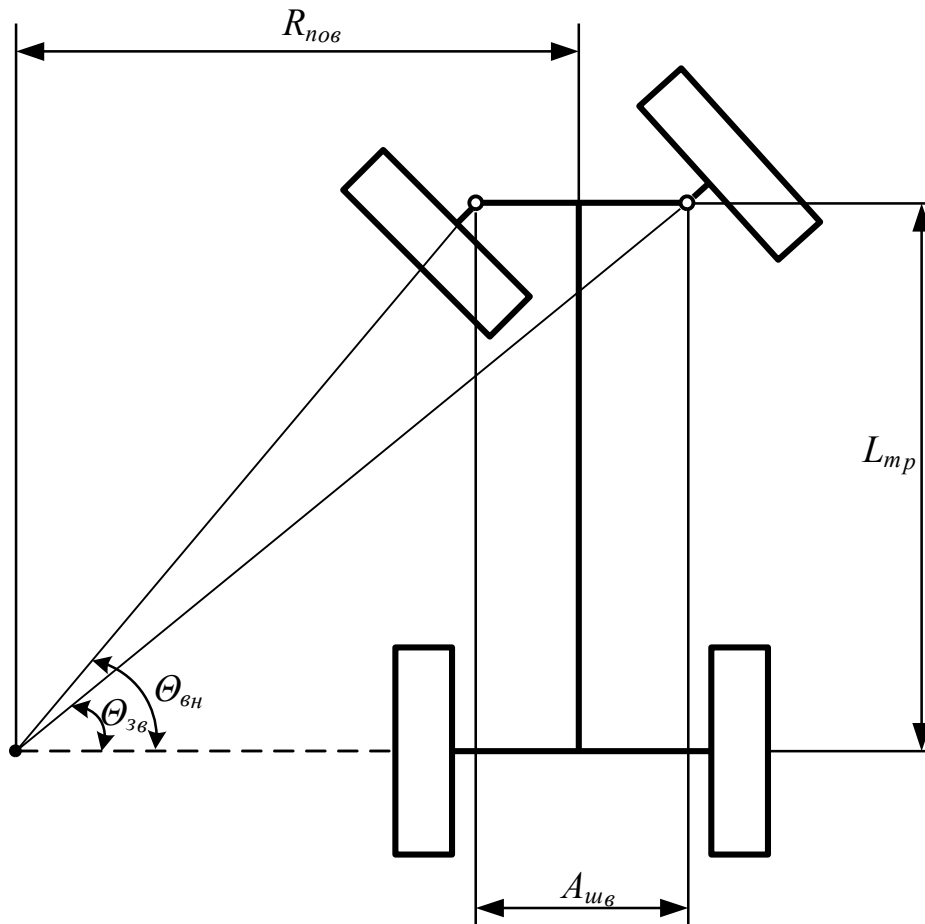


Рисунок 3.6 – Розрахункова схема кінематики повороту керованих коліс:

$R_{пов}$  – радіус повороту, м;  $L_{тр}$  – база тролейбусу, м;  $A_{шв}$  – відстань між шворнями (осями повороту коліс), м.;  $\Theta_{зов}$ ,  $\Theta_{вн}$  – відповідно кути повороту зовнішнього та внутрішнього колеса

Слід зазначити, що у подальшій розробці математичної моделі прийнято припущення щодо двомасового характеру механічної системи. Перше тіло є ротором ДРК, а друге – РП.

Відповідно щодо розрахункової схеми (див. рис. 3.6) лінії повороту для зовнішнього та внутрішнього колеса визначаються з урахуванням рівнянь [139]:

$$\operatorname{ctg}\Theta_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{пов}} - \frac{A_{\text{шв}}}{2}}{L_{\text{тр}}}, \quad (3.14)$$

$$\operatorname{ctg}\Theta_{\text{зв}} = \frac{R_{\text{пов}} + \frac{A_{\text{шв}}}{2}}{L_{\text{тр}}}, \quad (3.15)$$

де  $R_{\text{пов}}$  – радіус повороту, м;

$L_{\text{тр}}$  – база тролейбусу, м;

$A_{\text{шв}}$  – відстань між шворнями (осями повороту коліс), м.

Різниця між котангенсами кутів повороту зовнішнього та внутрішнього колеса визначається як:

$$\frac{A_{\text{шв}}}{L_{\text{тр}}} = \operatorname{ctg}\Theta_{\text{вн}} - \operatorname{ctg}\Theta_{\text{зв}}. \quad (3.16)$$

Механічна частина системи рульового керування тролейбусу характеризується наступними передавальними числами [22].

Кутове передавальне число рульового механізму:

$$i_{\omega_{\text{рм}}} = \frac{d\beta}{d\Omega} = \frac{\omega_{\beta}}{\omega_{\Omega}}, \quad (3.17)$$

де  $\omega_{\beta}$  – кутова швидкість рульового колеса, рад/с;

$\omega_{\Omega}$  – кутова швидкість валу сошки, рад/с;

$\beta$  – кут повороту рульового колеса, рад;

$\Omega$  – кут повороту вихідного валу рульового механізму, рад.

Передавальне число рульового приводу:

$$i_{\omega_{pn}} = \frac{d\Omega}{d\Theta_{KK}}, \quad (3.18)$$

де  $\Theta_{KK}$  – кут повороту керованих коліс, рад.

Передавальне число рульового приводу визначається довжиною і взаємним розташуванням важелів і тяг приводу, які в процесі повертання змінюються за довжиною і приводять до зміни передавального числа. В існуючих конструкціях кутове передавальне число рульового приводу варіюється в межах 0,85...1,1.

Кутове передавальне число системи рульового керування:

$$i_{\omega_{pk}} = i_{\omega_{pm}} \cdot i_{\omega_{pn}} = \frac{d\beta}{d\Theta_{KK}}. \quad (3.19)$$

Силове передавальне число:

$$i_c = \frac{M_{on}}{M_{вод}} = \frac{\sum M_{on.i}}{M_{вод}}, \quad (3.20)$$

де  $M_{on.i}$  – момент опору повороту і-го керованого колеса, Н·м;

$M_{вод}$  – момент на валу рульового колеса, Н·м.

Загалом ККД механічної частини рульового приводу тролейбусу визначається як:

$$\eta_{pk} = \frac{i_c}{i_{\omega_{pk}}} \quad (3.21)$$

При всьому різноманітті конструктивних виконань систем рульового керування тролейбусів з підсилювачем керма характерним є використання однакових конструктивних елементів [140]. В роботі була розроблена схема рульового керування з використанням у якості підсилювача рульового приводу двигуна з ротором що котиться (див. рис. 3.7). Така схема приближена до відомих схем підсилювачів, але має свої особливості відповідно щодо електропідсилювача.

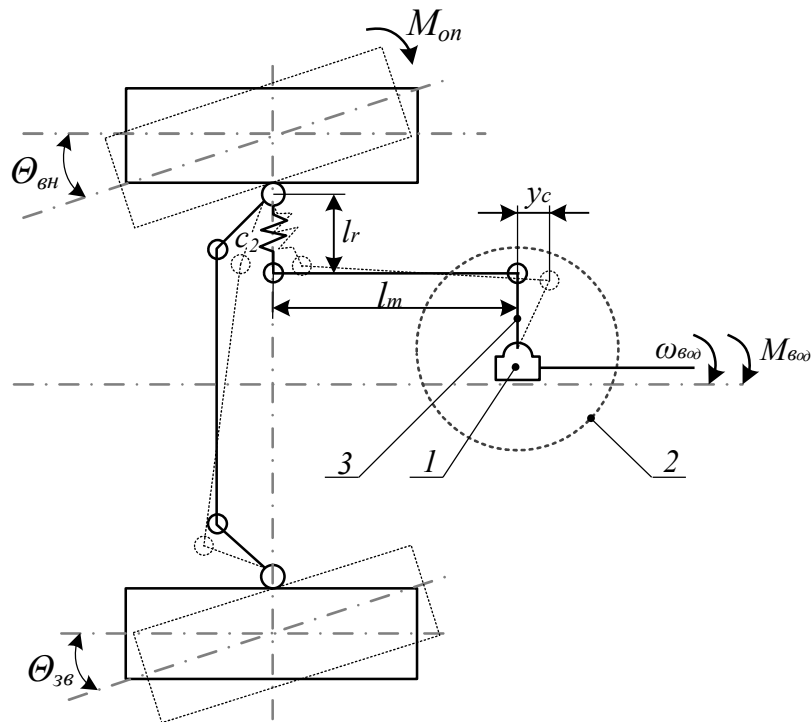


Рисунок 3.7 – Схема рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться:

1 – редуктор рульового приводу; 2 – ДРК; 3 – сошка;

Відповідно до розрахункової схеми рульового керування (див. рис. 3.7), на основі другого закону Ньютона, визначено диференціальне рівняння динаміки повороту керованих коліс, яке має вигляд [140]:

$$J_{\text{кк}} \frac{d^2\Theta_{\text{кк}}}{dt^2} = c_2 \arcsin\left(\left(\frac{l_m + y_c}{l_r}\right) - \Theta_{\text{кк}}\right) - M_{\text{он}} - M_t \operatorname{sgn}\left(\frac{dy_c}{dt}\right), \quad (3.22)$$

де  $J_{\text{кк}}$  – момент інерції керованих коліс у горизонтальній площині, кг·м<sup>2</sup>;

$c_2$  – жорсткість приводу керуючих коліс, Н·м/рад;

$M_t$  – момент тертя у рульовому приводі, Н·м;

$l_m$  – довжина тяги, м;

$l_r$  – відстань від тяги до поворотного важеля колеса, м;

$y_c$  – переміщення сошки, м.

Виходячи з аналізу розрахункової схеми (див. рис. 3.7) та рівняння (3.22) визначено, що важливою характеристикою є момент опору при повороті керованих коліс. Цей момент приводиться до осі шворня і його потрібно подолати для повороту керованих коліс [140].

У загальному випадку на кероване колесо діють ряд сил різної природи виникнення, з урахуванням яких опір повороту керованого колеса можна записати наступним чином [75]:

$$M_{\text{он}} = M_{\varphi} + M_p + M_{\text{ш}} + M_{\text{тр}} + M_j + M_{\text{тш}} + M_{\text{ст}} + M_{\text{рб}} + M_{\text{рп}} + M_{\text{гір}}, \quad (3.23)$$

де  $M_{\varphi}$  – момент опору повороту шини, Н·м;

$M_p$  – пружний момент у рульовому керуванні, Н·м;

$M_{\text{ш}}$  – стабілізуючий момент шини керованого колеса, що котиться, Н·м;

$M_{\text{тр}}$  – момент тертя у шворневому вузлі, Н·м;

$M_j$  – момент інерції, Н·м;

$M_{\text{тш}}$  – момент опору від тертя в кулькових шарнірах;

$M_{\text{ст}}$  – ваговий стабілізуючий момент, Н·м;

$M_{\text{рб}}$  – швидкісний стабілізуючий момент від рівнодіючої бокових сил, Н·м;

$M_{\text{рп}}$  – момент опору викликаний рівнодіючою повздовжніх сил, Н·м;

$M_{\text{гір}}$  – гіроскопічний момент, Н·м.

Моменти опору викликані рівнодіючою поздовжніх сил  $M_{pn}$ , швидкісного стабілізуючого моменту від рівнодіючої бокових сил  $M_{p\phi}$ , гіроскопічного моменту  $M_{zip}$  під час руху є незначними [75]. На поверхнях з високим коефіцієнтом зчеплення при повороті керованого колеса на місці, момент опору повороту шини  $M_\phi$  досягає до 90% від загального значення [76]. Зменшення моменту опору повороту шини  $M_\phi$  відбувається під час руху, що призводить до зменшення загального моменту опору повороту керованих коліс. У більшості випадків, з урахуванням найбільшого впливу моменту опору повороту шини  $M_\phi$  на загальний момент опору повороту керованих коліс, ці момент прирівнюють [76, 139]. Твердження, що розглянути раніше, будуть справедливими за умови, якщо центр повороту контактної відбитку шини керованого колеса буде знаходитися у межах даного відбитку [75].

Момент опору повороту шини  $M_\phi$  у загальному випадку залежить від [76–87, 139]:

- кута повороту колеса;
- положення центру повороту відносно контактної відбитку;
- конструктивних особливостей підвіски керованих коліс;
- коефіцієнту зчеплення з дорожнім покриттям;
- навантаження на колесо.

Положення центру повороту контактної відбитку відносно його геометричного центру визначається геометричними розмірами елементів підвіски керованих коліс. Положення центру повороту характеризується такими величинами, як плече обкатки та плече стабілізації.

Плечем обкатки називають відстань між геометричним центром повороту контактної відбитку до великої осі даного відбитку [78]. На основі розрахункової схеми (див. рис. 3.8) плече обкатки визначається:

$$l_0 = l_y - r_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{u0} + \gamma_{u0}) , \quad (3.24)$$

де  $l_y$  – довжина цапфи, м;

$r_k$  – радіус керованого колеса, м;

$\alpha_{ш}$  – кут поперечного нахилу шворня, рад;

$\gamma_{ш0}$  – кут розвалу керованого колеса, рад.

Плечем стабілізації називається відстань між геометричним центром повороту контактної відбитки до малої осі даного відбитку [86]. На основі розрахункової схеми (див. рис. 3.8) плече стабілізації запишеться як:

$$y_{cm} = r_k \cdot \operatorname{tg} \beta_{ш} \quad (3.25)$$

де  $\beta_{ш}$  – кут повздовжнього нахилу шворня, рад.

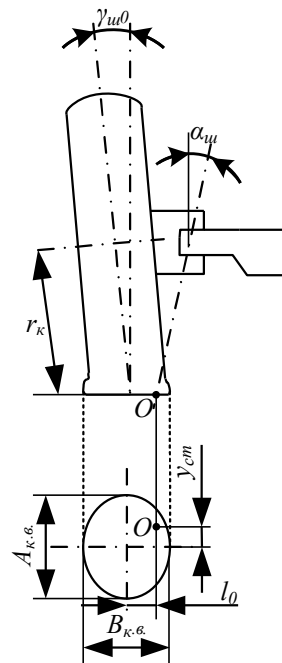


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема визначення положення центру повороту контактної відбитки керованого колеса [139]:

$r_k$  – радіус керованого колеса;  $\alpha_{ш}$  – кут поперечного нахилу шворня;

$\gamma_{ш0}$  – кут розвалу керуючого колеса;  $l_0$  – плече обкатки;  $A_{к.в}$ ,  $B_{к.в}$  – довжини сторін контактної відбитки;

Реальний контактний відбиток керованого колеса тролейбусу може бути різної форми (овалу, еліпсу, а також наближуватися до кола або прямокутника). Форма може залежати не тільки від геометричних розмірів

шини та керованого колеса загалом, а й від навантаження на колесо або тиск у шинах тролейбусу. Отримати універсальні залежності, які дозволяють з великою точністю визначати момент опору повороту шини  $M_\varphi$  дозволяють методи приведення контактного відбитку шини до рівновеликого прямокутника, що представляє систему рівнянь [75, 86]:

$$\begin{cases} F_0 = F_{nn} = a_{к.в} \cdot b_{к.в} \\ \frac{A_{к.в}}{B_{к.в}} = \frac{a_{к.в}}{b_{к.в}} \end{cases}, \quad (3.26)$$

де  $F_0$  – площа реального відбитку, м<sup>2</sup>;

$F_{nn}$  – площа приведенного прямокутника, м<sup>2</sup>;

$a_{к.в}, b_{к.в}$  – сторони приведенного рівновеликого прямокутника, м;

$A_{к.в}, B_{к.в}$  – сторони реального контактного відбитку, м.

Така система рівнянь (3.26) відповідає основним вимогам для достовірності приведення прямокутного відбитку до реального. Серед вимог виділяються [75]:

- площі реального та приведенного контактного відбитку повинні бути рівними;
- співвідношення сторін приведенного прямокутника та реального відбитку повинні бути рівними;
- геометричні центри приведенного прямокутника та реального контактного відбитку повинні співпадати.

Визначення миттєвого значення моменту опору повороту шини керованих коліс має певні складнощі. Тому що опір повороту змінює своє значення в залежності від кута повороту, а також від фіксованих значень величин, які визначаються конструкцією рульового керування та підвіски керованих коліс. Залежність величини моменту опору від кута повороту керованих коліс, можна розділити три ділянки [76]:



- лінійної залежності  $M_{\varphi}=f(\Theta_{kk})$ . Дана ділянка характеризується пружним закручуванням тіла шини між контактним відбитком та ободом керованого колеса. У такому випадку між опорною поверхнею та контактним відбитком присутні лише зони зчеплення, а зони ковзання – відсутні. На сухих поверхнях з високим коефіцієнтом зчеплення така ділянка знаходиться у межах  $0..5^{\circ}$ ;

- нелінійної залежності  $M_{\varphi}=f(\Theta_{kk})$ . Ділянка характеризується наявністю у зоні контакту опорної поверхні з контактним відбитком зон зчеплення та зон ковзання. Причому на даній ділянці присутня тенденція щодо зменшення зони зчеплення, а зони ковзання збільшуються. На сухих поверхнях, з високим коефіцієнтом зчеплення, ділянка знаходиться у межах  $5...13^{\circ}$  повороту керованого колеса;

- граничного за зчепленням моменту опору повороту шини  $M_{\varphi max}=f(\Theta_{kk})$ . На даній ділянці у місці контакту опорної поверхні з контактним відбитком присутні лише зони ковзання, а величина моменту опору повороту шини керованих коліс досягає максимального граничного значення. На сухих поверхнях з високим коефіцієнтом зчеплення ділянка знаходиться у межах більше  $13^{\circ}$  повороту керованого колеса;

Момент на ділянці пружного закручування тіла шини визначається як [76]:

$$M_{\varphi} = c_{\omega} \Theta_{kk}, \quad (3.27)$$

де  $c_{\omega}$  – кутова жорсткість шини, Н·м/град;

Значення кутової жорсткості шини [76]:

$$c_{\omega} = k_{\omega} G_k \cdot 10^{-3} \quad (3.28)$$

де  $G_k$  – навантаження на кероване колесо, Н;

$k_\omega$  – коефіцієнт жорсткості, визначається у межах 9...11 [76].

Момент опору повороту шини на ділянці з нелінійною залежністю визначається, як [76]:

$$M_\phi = M_{\phi max} - (M_{\phi max} - c_\omega \Theta_{\kappa\kappa}) \left( \frac{\Theta_B - \Theta_{\kappa\kappa}}{\Theta_B - \Theta_A} \right)^2, \quad (3.29)$$

де  $M_{\phi max}$  – 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,  $\Theta_B = 13^\circ$ .

Для визначення граничного за зчепленням моменту опору повороту шини рекомендується використовувати залежність [76]:

$$M_{\phi max} = \frac{G_k \cdot \mu_z}{16 \cdot a_{\kappa\phi} \cdot b_{\kappa\phi}} \left[ \begin{array}{l} (a_{\kappa\phi} + 2y)(b_{\kappa\phi} + 2l_0) \sqrt{(a_{\kappa\phi} + 2y)^2 + (b_{\kappa\phi} + 2l_0)^2} + \\ + (a_{\kappa\phi} - 2y)(b_{\kappa\phi} + 2l_0) \sqrt{(a_{\kappa\phi} - 2y)^2 + (b_{\kappa\phi} + 2l_0)^2} + \\ + (a_{\kappa\phi} + 2y)(b_{\kappa\phi} - 2l_0) \sqrt{(a_{\kappa\phi} + 2y)^2 + (b_{\kappa\phi} - 2l_0)^2} + \\ + (a_{\kappa\phi} - 2y)(b_{\kappa\phi} - 2l_0) \sqrt{(a_{\kappa\phi} - 2y)^2 + (b_{\kappa\phi} - 2l_0)^2} \end{array} \right], \quad (3.30)$$

де  $\mu_z$  – коефіцієнт зчеплення шини з контактною поверхнею.

При повороті керованих коліс тролейбусу під час руху відбувається закручування тіла шини між контактним відбитком та ободом диску колеса. Проте, за рахунок обертання колеса тролейбуса елементи шини, які контактують з опорною поверхнею, постійно оновлюються. При цьому, коли водій перестане повертати керовані колеса, закручування тіла шини керованих коліс зникне за рахунок оновлення елементів шини [75–87].

На основі дослідних даних [75, 76] за відсутності поздовжнього нахилу шворня підвіски керованих коліс тролейбуса кут закручування тіла шини керованих коліс визначається залежністю:

$$\Theta_3 = \frac{a_{вш} \cdot \omega_{кк}}{2 \cdot v_{трол}}, \quad (3.31)$$

Де  $v_{трол}$  – швидкість руху тролейбусу, м/с;

$a_{вш}$  – довжина контактного відбитку відносно більшої осі, м;

$\omega_{кк} = \frac{d\Theta}{dt}$  – кутова швидкість повороту керованого, рад/с;

За наявності повздовжнього нахилу шворня підвіски керованих коліс тролейбуса кут закручування тіла шини керованих коліс матиме вигляд [75]:

$$\Theta_3 = \frac{(a_{вш} + 2 \cdot r_k \cdot tg\beta_{ш}) \cdot \omega_{кк}}{2 \cdot v_{трол}}. \quad (3.32)$$

Враховуючи той факт, що з точки зору явищ, які визначають момент опору повороту керованих коліс тролейбуса під час руху та на місці є ідентичними, то момент опору керованих коліс, за умови руху тролейбуса дорівнює:

$$M_{\phi v} = c_{\omega} \cdot \Theta_3. \quad (3.33)$$

Отримана залежність (3.33), як правило знаходиться на прямолінійній ділянці залежності моменту опору повороту шини від кута повороту.

### **3.5 Розробка функціональних схем системи рульового керування тролейбусу та узагальнення її математичної моделі.**

Керування електричним приводом підсилювача рульового керування тролейбусу забезпечується системою керування струмами котушок полюсів ДРК. Для створення імітаційної моделі та моделювання процесів системи

рульового керування тролейбусу розроблено структурну схему системи керування (рис. 3.9).

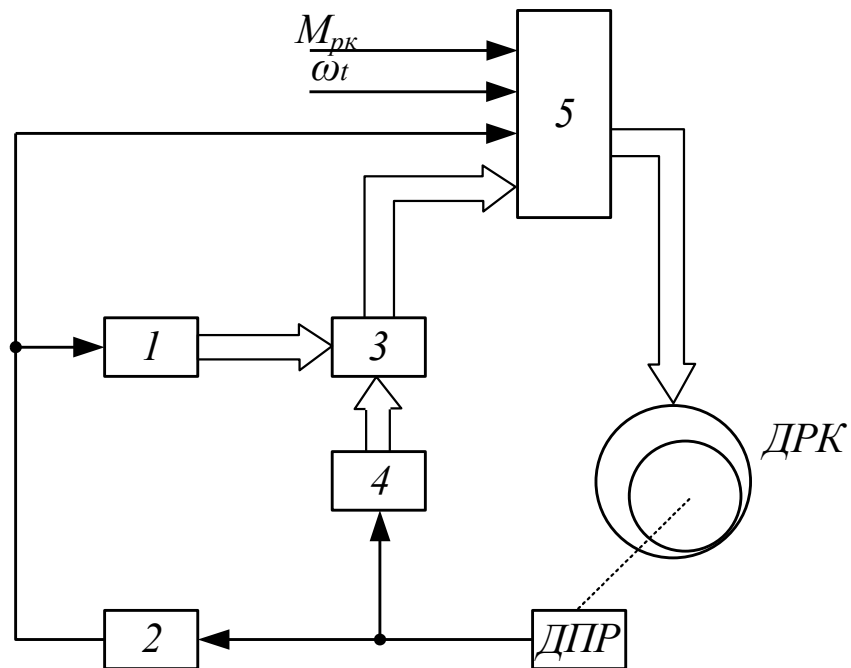


Рисунок 3.9 – Структурна схема системи керування електричним приводом у складі системи рульового керування тролейбуса:  $\omega_t$  – сигнал завдання частоти обертання ротора;  $M_{pk}$  – момент опору на рульовому колесі; ДРК – двигун з ротором що котиться; ДПР – датчик положення ротора; 1 – блок визначення кутів увімкнення та вимкнення котушок статора; 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.

Електричний привод системи (див. рис. 3.9) має канал керування кутом положення ротора відносно розточки статора. Для визначення синхронної частоти обертання ротора сигнал з датчика положення ротора (ДПР) надходить до блоку 2. Блок 1 розраховує кути увімкнення та вимкнення для кожної фази двигуна з ротором що котиться (ДРК). Блок 3 проводить порівняння кутів увімкнення та вимкнення, які надходять з блоку 1 та блоку 4

з розрахованими у блоці 4 кутами повороту ротора відносно кожного полюсу ДРК.

У блоці 5 відбувається формування комутаційних імпульсів для кожної котушки ДРК, а також контроль синхронної частоти обертання ротора в залежності від сигналу завдання частоти обертання ротора та моменту опору на рульовому колесі.

Для електричного кола котушок двигуна ДРК складено функціональну схему на основі математичних рівнянь (3.9) – (3.13) (див. рис. 3.10). Схема використовується для подальшої реалізації моделі у програмних математичних комплексах імітаційного моделювання.

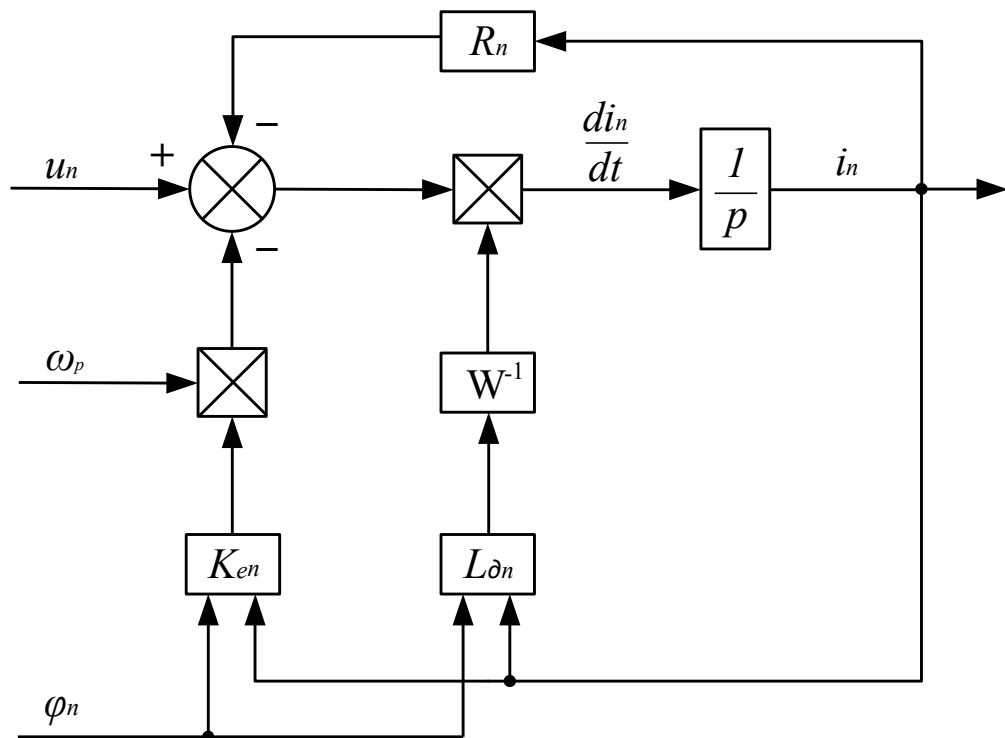


Рисунок 3.10 – Функціональна схема котушки полюсу ДРК

З урахуванням розрахункової схеми рульового керування тролейбусу (див. рис. 3.7), можна побачити елементи, які характеризують жорсткість приводу керуючих коліс. Тому, у даному випадку, система рульового приводу тролейбусу розглядається як двомасова.

У загальному випадку рівняння рівноваги механічної підсистеми з двома ступенями свободи характеризується наступною системою рівнянь [87]:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_y \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_y - M_{on} \\ M_y = c_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt \end{cases}, \quad (3.34)$$

де  $M_1$  – обертальний момент двигуна, Н·м;

$M_y$  – момент пружних сил, Н·м;

$J_1, J_2$  – відповідно моменти інерції першої та другої маси.

$c_{12}$  – приведений коефіцієнт жорсткості, Н·м/рад;

$\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості відповідно першої та другої маси.

На основі виразу (3.34) підсумкове рівняння механічної підсистеми системи рульового керування тролейбуса на базі ДРК матиме вигляд:

$$\begin{cases} J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_{ДРК} + M_{вод} - M_y \\ J_{\kappa\kappa} \frac{d^2\Theta_{\kappa\kappa}}{dt^2} = M_y - M_{on} - M_t \operatorname{sgn}\left(\frac{dy_c}{dt}\right) \\ M_y = c_{12} \arcsin\left(\left(\frac{l_u + y_c}{l_r}\right) - \Theta_{\kappa\kappa}\right) \int (\omega_p - \omega_{\kappa\kappa}) dt \end{cases}, \quad (3.35)$$

Відповідно рівнянням механічної частини (3.2) – (3.8), (3.35) складено функціональну схему механічної підсистеми, яка представлена на рисунку 3.11.

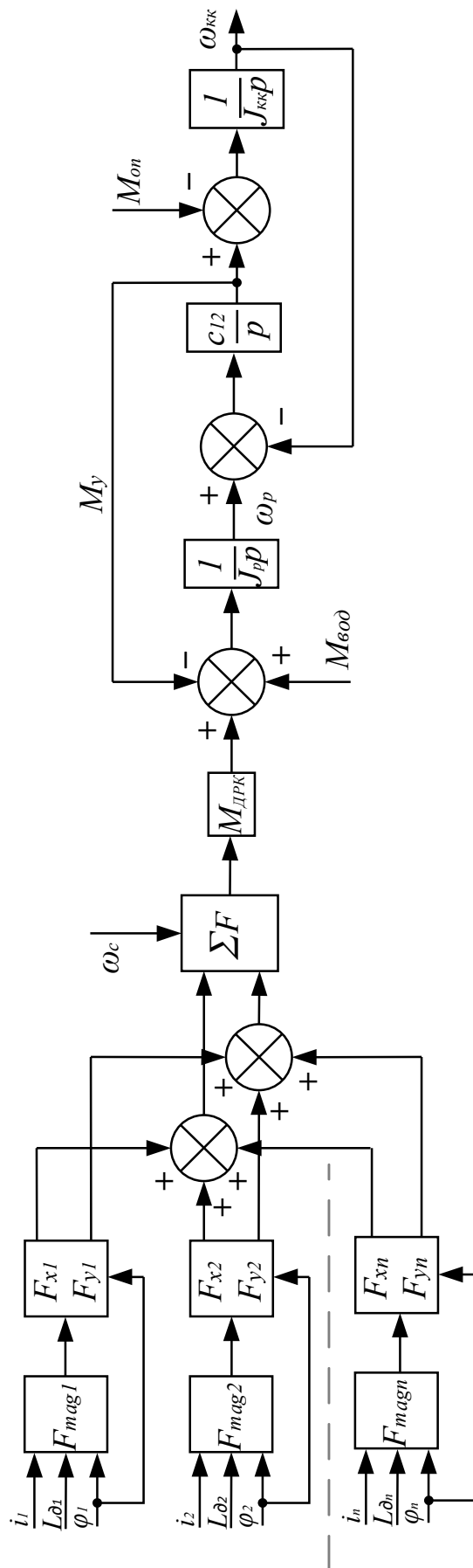


Рисунок 3.11 – Функціональна схема механічної частини рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться

При цьому узагальнена математична модель рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем рульового приводу на базі ДРК матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_n = i_n R_n + \frac{di_n}{dt} \cdot L_{\partial n} + K_{en} \cdot \omega_p \\
 J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_{ДРК} + M_{\text{вод}} - M_y \\
 J_{\kappa\kappa} \frac{d^2\Theta_{\kappa\kappa}}{dt^2} = M_y - M_{on} - M_t \operatorname{sgn}\left(\frac{dy_c}{dt}\right) \\
 \frac{d\varphi_p}{dt} = \omega_p \\
 \frac{d\Theta_{\kappa\kappa}}{dt} = \omega_{\kappa\kappa} \\
 M_y = c_{12} \arcsin\left(\left(\frac{l_m + y_c}{l_r}\right) - \Theta_{\kappa\kappa}\right) \int (\omega_p - \omega_{\kappa\kappa}) dt \\
 L_{dn} = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( a_{s,j-1}^{(i)} \cdot s \cdot (i - i_{j-1})^{s-1} \cdot b_{k,j-1}^{(\varphi)} (q - q_{j-1})^k \right), \\
 K_{en} = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( a_{s,j-1}^{(i)} (i - i_{j-1})^s \cdot b_{k,j-1}^{(\varphi)} \cdot k \cdot (q - q_{j-1})^{k-1} \right) \\
 F_{magn} = \sum_{s=0}^3 \sum_{k=0}^3 \left( c_{s,j-1}^{(i)} (i - i_{j-1})^s \cdot d_{k,j-1}^{(\varphi)} (q - q_{j-1})^k \right) \\
 F_{xn} = F_{magn} \cdot \cos\varphi_n \\
 F_{yn} = F_{magn} \cdot \sin\varphi_n \\
 F_Z = m_p \omega_c^2 e \\
 F_N = F_Z + \sum F_{xn} \\
 F_R = \mu_k F_N \\
 F_{ДРК} = \sum F_{yn} - F_R \\
 M_{ДРК} = F_{ДРК} \cdot R_{p.зovн.}
 \end{array} \right. \quad (3.36)$$



За результатами проведеної роботи удосконалено математичну модель системи рульового керування тролейбусу. Математична модель складається з системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які враховують геометричні параметри підвіски керованих коліс та масогабаритні характеристики ТЗ, момент опору при повороті керованих коліс, швидкість руху ТЗ, а також попередньо розраховані методом скінченних елементів електромагнітні та механічні параметри двигуна з ротором що котиться.

### **Висновки за розділом 3**

1. Розроблено структурну схему системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться. За схемою визначені основні функціональні можливості системи рульового керування тролейбусу та зазначено порядок взаємодії елементів системи.

2. Розроблено функціональні схеми елементів системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

3. Удосконалено математичну модель рульового керування тролейбусу. Особливістю математичної моделі є врахування масогабаритних характеристик та швидкості руху тролейбусу, геометричних параметрів рульового приводу, моменту опору при повороті керованих коліс, а також попередньо розрахованих, методом скінченних елементів, електромагнітних та механічних параметрів двигуна з ротором що котиться.

Ряд результатів дослідження представлених у розділі було опубліковано у наукових працях [2] – [5].

## РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСУ З ПІДСИЛЮВАЧЕМ РП НА БАЗІ ДРК

### 4.1 Інструменти розрахунку та моделювання системи рульового керування троллейбусу.

Проблематика дослідження сучасних електромеханічних систем визначає високі критерії та вимоги щодо якості та точності результатів, які отримуються під час дослідження системи. Це призводить до розв'язання та створення математичних моделей, які складаються зі складних систем рівнянь [69].

За останні роки, зі швидким зростанням обчислювальних можливостей та використанням комп'ютерної техніки, в усьому світі накопичено велику кількість програмного забезпечення у вигляді бібліотек, комп'ютерних програм, призначених для розв'язання складних математичних задач.

Для проведення моделювання з використанням математичних методів дослідження використовуються сучасні пакети програм. З їхньою допомогою можливо з достатньою точністю проводити характерні дослідження для поставлених у дисертаційній роботі задач. Насамперед це відноситься до розрахунків системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь системи рульового керування троллейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі ДРК у пакетах імітаційного моделювання.

Під час вибору математичних пакетів імітаційного моделювання особлива увага приділяється до мовних засобів, завдяки яким можлива реалізація поставлених у роботі задач та визначених методів дослідження.

Сучасні мови моделювання та їхні програмні пакети розроблені для представлення як самої математичної моделі так і надання додаткових можливостей впливу на хід експерименту та обробки отриманих результатів [141–145]. Найбільш відомими у сучасному світі є наступні математичні пакети: R, Mathematica, Maple, MatLab, MathCad, Modelica.

Для імітаційного моделювання системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі ДРК використовується пакет MatLab, який має у своєму складі [145]:

- інтерпретовану мову програмування високого рівня із широкими можливостями роботи з матричними структурами даних;
- графічний інтерфейс який інтегрований у пакет середовища моделювання;
- широкі можливості графічного відображення даних;
- можливості розробки алгоритмів;
- роботу із зовнішніми апаратними комплексами та програмним забезпеченням.

Під час використання пакету MatLab у роботі застосовується широкий спектр можливостей для аналізу результатів дослідження:

- вирішення лінійних рівнянь;
- розрахунок коренів многочленів будь-якого ступеня, диференціювання, екстраполяції, інтерполяції кривих;
- побудова графіків будь-яких функцій;
- статичний аналіз даних;
- розв’язок диференціальних рівнянь у часткових похідних, лінійних та нелінійних рівнянь;
- виконання операцій обчислення цілочислової арифметики;

Для імітаційного блочного моделювання використовується пакет MatLab Simulink. Застосування MatLab Simulink, який містить інструментарій моделювання складних систем, виправдано наявністю візуально-орієнтованого блочного імітаційного моделювання, яке дає широкі можливості оцінки динамічних процесів електроприводу у системі рульового керування тролейбусу.

## 4.2 Імітаційна модель системи рульового керування тролейбусу

Імітаційна модель системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК базується на узагальненій у третьому розділі математичній моделі (3.36), що складається з системи диференційних рівнянь та алгебраїчних залежностей. Імітаційна модель розроблена у програмному комплексі Matlab з використанням пакету візуального програмування Simulink у відповідності до функціональних схем (рис. 3.9–3.11). Загальний вигляд імітаційної моделі представлений на рисунку 4.1.

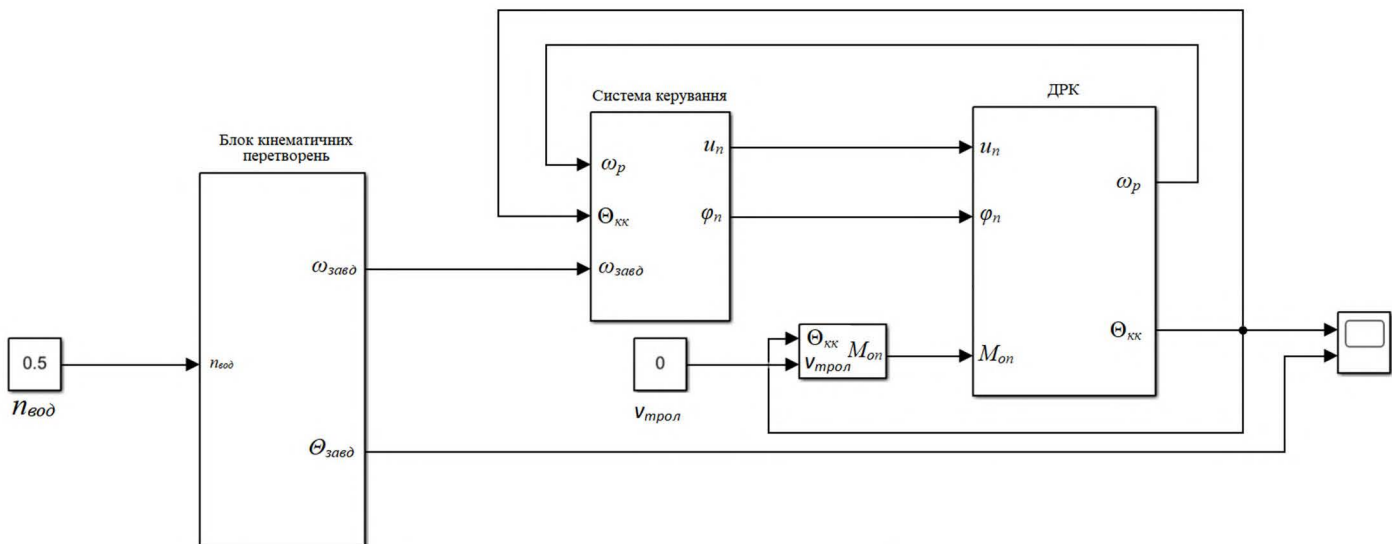


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель для дослідження системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК.

Вхідними параметрами для початку розрахунку є частота обертання рульового колеса  $n_{вод}$ , швидкість руху ТЗ  $v_{трол}$ , визначені у 2 розділі параметри рухомого складу, а також початкові та граничні умови моделювання, які наведені у Додатку Г.

Відповідно до функціональної схеми (див. рис. 3.10) на рисунку 4.2 приведена Simulink-модель полюсу ДРК. Вхідними параметрами моделі є напруга живлення  $u$ , кутова частота обертання ротора ДРК  $\omega_p$ , кут повороту точки мінімального магнітного зазору відносно полюса статора ДРК  $\varphi$ .

На основі залежностей (3.9) – (3.13) визначається струм котушки полюсу ДРК. У Simulink-модель інтегровано блок визначення миттєвих значень потокозчеплення, диференціальної індуктивності та коефіцієнту проти-ЕРС, а також блок визначення складових магнітної сили полюсу ДРК на основі рівнянь (2.41) – (2.44) (див. рис. 4.3).

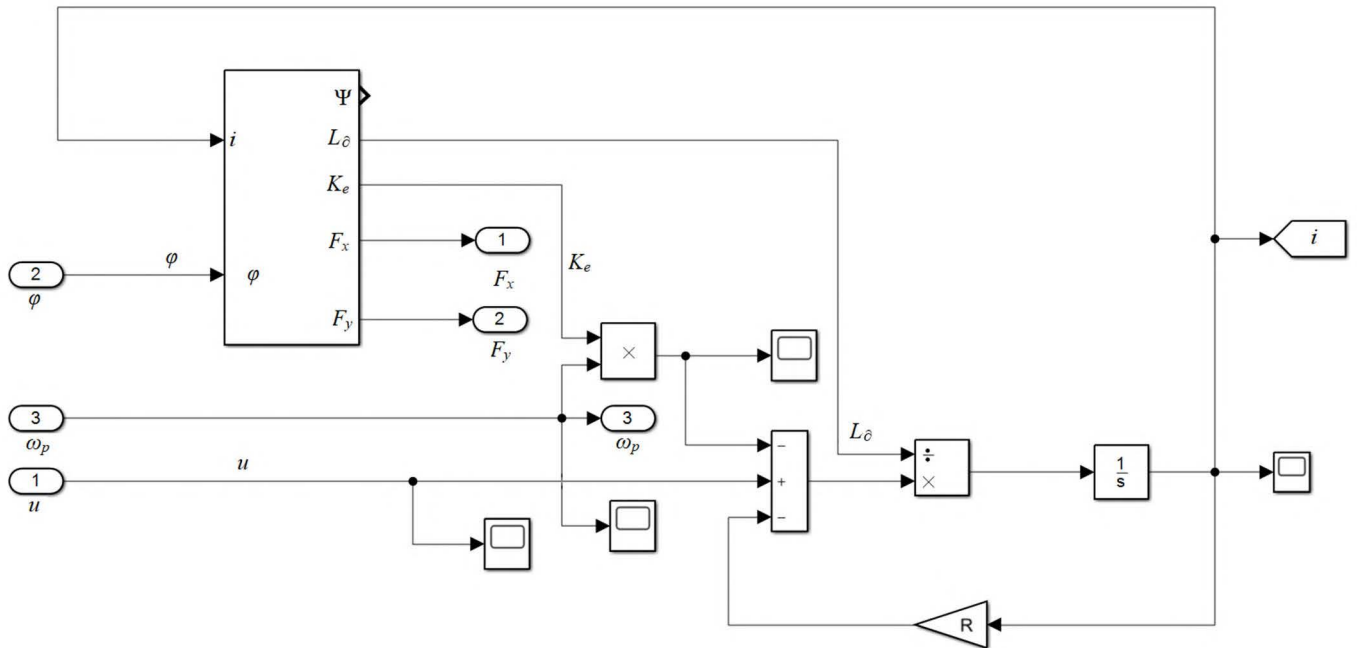


Рисунок 4.2 – Simulink-модель полюсу ДРК

До вхідних параметрів блоку (див. рис. 4.3) належать струм котушки полюса ДРК  $i$  та кут повороту точки мінімального магнітного зазору відносно полюса ДРК  $\varphi$ .

Визначення миттєвих значень диференціальної індуктивності, коефіцієнту проти-ЕРС та потокозчеплення відбувається у відповідних ланках  $L_\delta$ ,  $K_e$  та  $\Psi$  (див. рис. 4.3).

Значення струму  $i$  та кута  $\varphi$  надходять також до блоку визначення радіальної та тангенціальної складових магнітної сили полюсу ДРК, який представлений на рисунку 4.4.

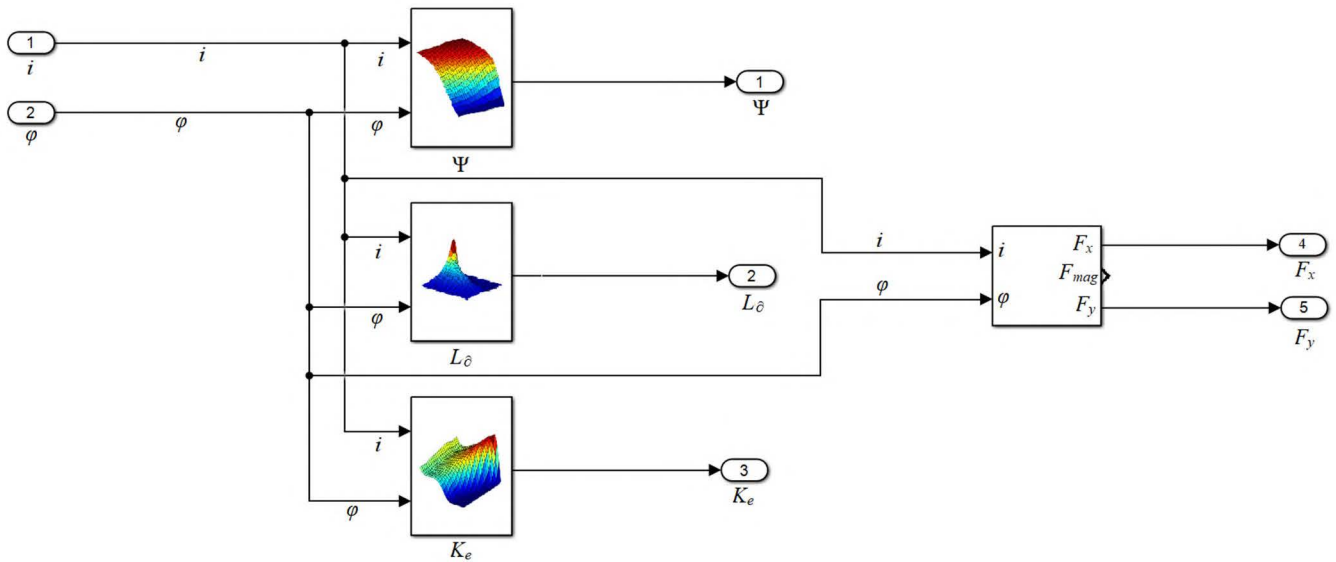


Рисунок 4.3 – Блок розрахунку значень потокозчеплення, коефіцієнту проти-ЕРС та диференціальної індуктивності полюсу ДРК

Даний блок (див. рис. 4.4) на основі прийнятих вхідних параметрів розраховує значення магнітної сили  $F_{mag}$ , а також значення тангенціальної  $F_y$  та радіальної сили  $F_x$ , яка створюється полюсом статора ДРК.

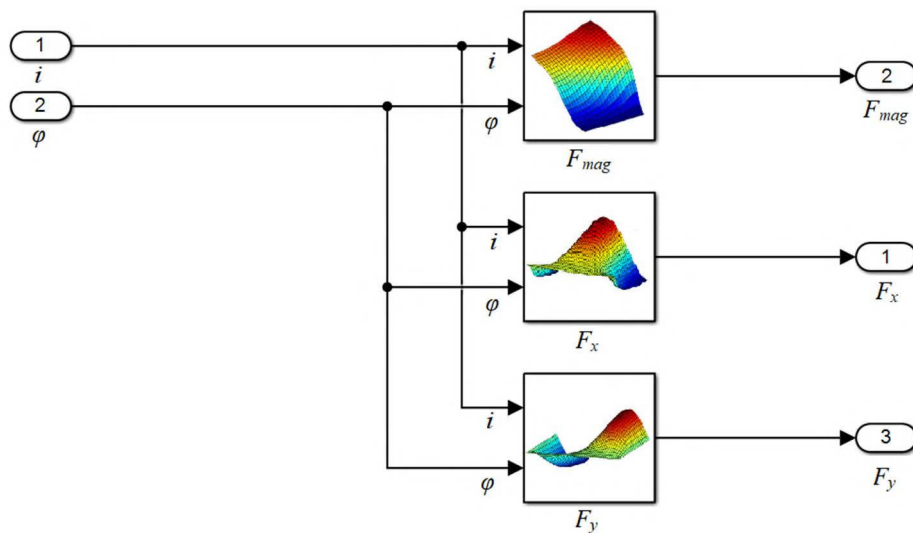


Рисунок 4.4 – Блок розрахунку значень складових магнітної сили полюсу ДРК

Визначені значення тангенціальної  $F_y$  та радіальної магнітної сили  $F_x$  усіх полюсів статора ДРК додаються один до одного за допомогою суматора.

Після чого суми тангенціальної  $\sum F_y$  та радіальної  $\sum F_x$  магнітних сил передаються до моделі визначення загальної сили одностороннього магнітного тяжіння ДРК  $F_{ДРК}$  представленої на рисунку 4.5.

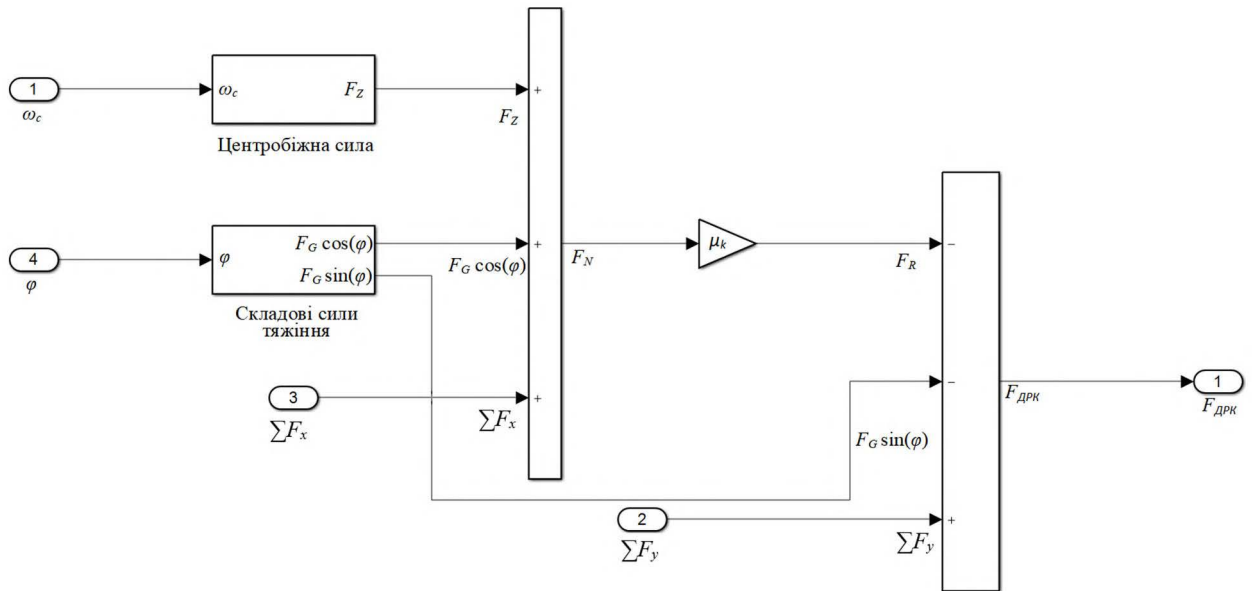


Рисунок 4.5 – Simulink-модель розрахунку загальної сили одностороннього магнітного тяжіння ДРК

Вхідними параметрами моделі (див. рис. 4.5) є кут повороту між точкою мінімального магнітного зазору та «початковим» положенням ротору ДРК  $\varphi$ , а також кутова частота обертання вектору магнітного поля статора  $\omega_c$ . Дана модель враховує просторове положення ДРК для визначення впливу складової сили ваги  $F_G$  на силу нормальної реакції опори  $F_N$ . Елементи моделі розраховують центробіжну силу  $F_Z$  та силу тертя між направляючими статора та ротора  $F_R$ .

Відповідно до функціональної схеми (див. рис. 3.11) та системи рівнянь (3.35) на рисунку 4.6 приведена Simulink-модель механічної частини рульового приводу.

Вхідними параметрами моделі (див. рис. 4.6) є сила одностороннього магнітного тяжіння  $F_{ДРК}$ , момент, який створює водій ТЗ  $M_{вод}$  та момент опору повороту керованих коліс тролейбуса  $M_{он}$ . Вихідними параметрами моделі є

кутова частота обертання вихідного валу ротора ДРК  $\omega_p$  та кут повороту керованих коліс  $\Theta_{кк}$ .

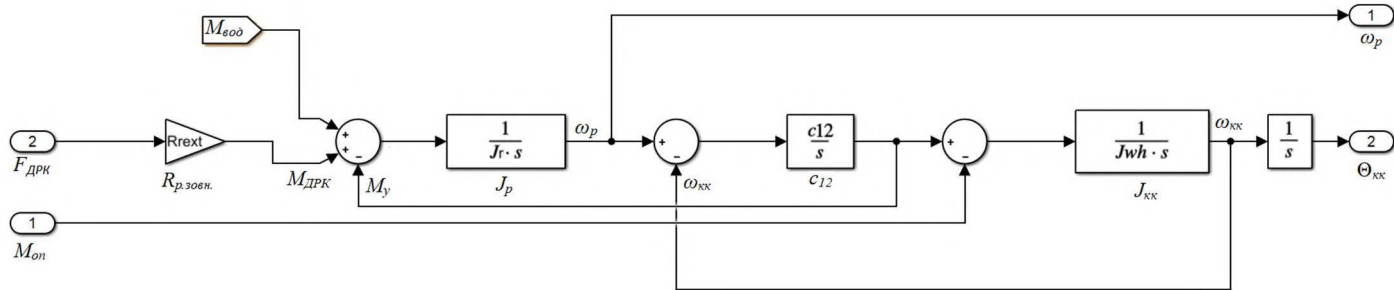


Рисунок 4.6 – Simulink-модель механічної частини рульового приводу.

Для здійснення регулювання вихідних характеристик підсилювача РП системи рульового керування тролейбусу, спираючись на структурну схему рис. 3.9 розроблена модель системи керування (див. рис. 4.7). Вона забезпечує подачу керуючих імпульсів на котушки полюсів ДРК в залежності від положення ротора ДРК відносно статора, кута повороту керованих коліс, а також моменту опору на рульовому колесі тролейбусу. Вхідними сигналами є частота обертання вихідного валу ДРК  $\omega_p$ , частота обертання завдання вихідного валу ДРК  $\omega_{завд}$  (пропорційна швидкості обертання рульового колеса водієм ТЗ через передаточне відношення редуктора РП), кут повороту керованих коліс  $\Theta_{кк}$ , а також момент опору на рульовому колесі тролейбуса  $M_{оп}$ .

Дана модель включає в себе підсистеми ДПР, контролю кута повороту керованих коліс, а також контролю моменту на рульовому колесі. Підсистема ДПР (див. рис. 4.8), в залежності від положення ротора відносно розточки статора, формує керуючі імпульси для кожної котушки статора ДРК. Сигнал з ДПР перемножується з сигналами від підсистем контролю кута повороту керованих коліс (див. рис. 4.9) та контролю крутного моменту на рульовому колесі (див. рис. 4.10) для формування загального керуючого впливу на котушки статора ДРК.



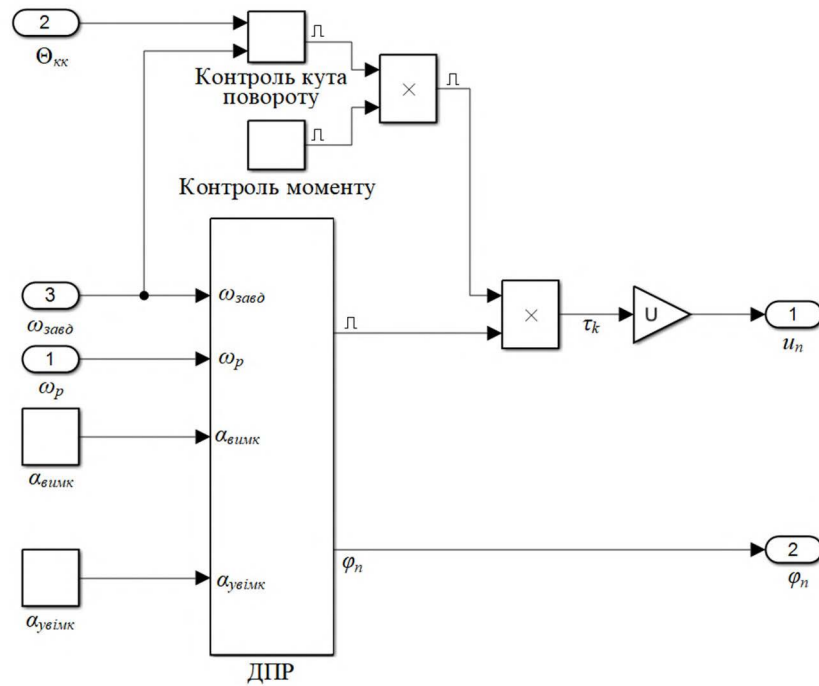


Рисунок 4.7 – Simulink-модель системи керування підсилювачем РП на базі ДРК

Положення ротора відносно кожного полюсу ДРК розраховується за допомогою виразу (4.1) у елементі КTs блоку ДТР (див. рис. 4.8) та приводиться до діапазону  $0 \dots 360^\circ$  у елементі блоку mod. Після чого отримане значення кута повороту порівнюється з заданими кутами увімкнення та вимкнення керуючого сигналу.

Фазовий зсув для кожного полюсу ДРК відносно «початкового положення» визначається за аналітичним виразом:

$$\Delta\alpha_\phi = \frac{360}{m}(n-1), \quad (4.1)$$

де  $m$  – кількість полюсів ДРК;

$n$  – порядковий номер полюсу відносно «початкового положення».

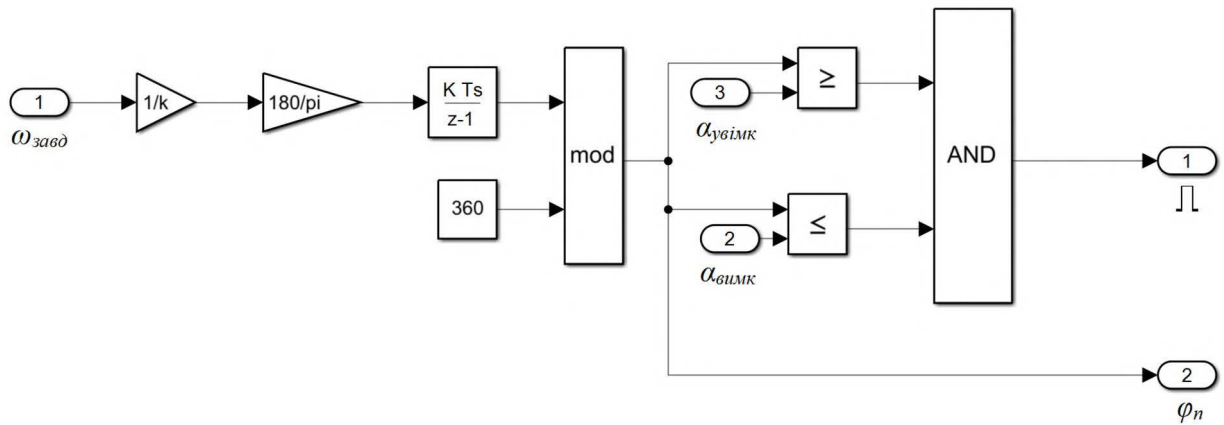


Рисунок 4.8 – Підсистема ДПР у середовищі Matlab Simulink

Підсистема контролю кута повороту керованих коліс (див. рис. 4.9) порівнює значення кута повороту керованих коліс  $\Theta_{кк}$  із завданням, та за допомогою ПІД-регулятора генерує керуючий імпульс у вигляді логічної одиниці або нуля.

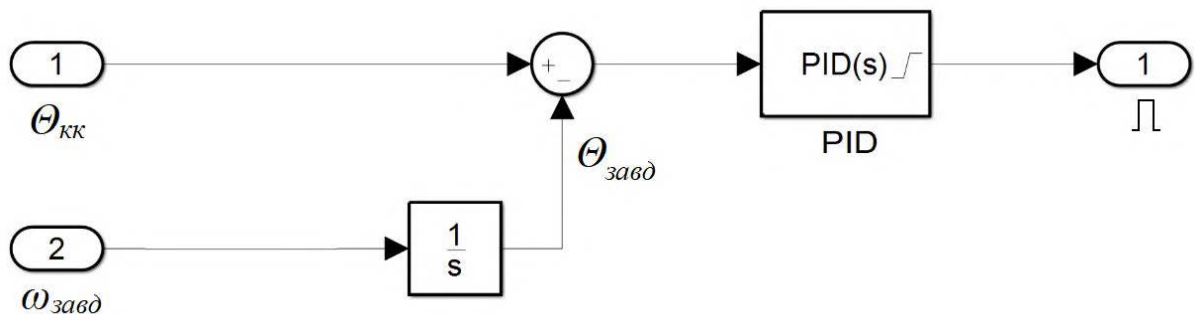


Рисунок 4.9 – Підсистема контролю кута повороту керованих коліс у середовищі Matlab Simulink

У роботі підбір параметрів ПІД-регулятора здійснювався за допомогою додатку Simulink Response Optimization програмного пакету Matlab. Simulink Response Optimization має широкий набір налаштувань, який дозволяє автоматично оптимізувати параметри системи для покращення її характеристик. Параметри можуть бути налаштовані відповідно до вимог у часовій або частотній областях (запас по фазі, перерегулювання, тощо). Спираючись на [146–148] у додатку Simulink Response Optimization було

визначено коефіцієнти ПІД-регулятора для підсистеми контролю кута повороту керованих коліс які наведені у Додатку Г. Коефіцієнти ПІД-регуляторів інших блоків імітаційної моделі визначалися аналогічним чином.

Підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі працює наступним чином (див. рис. 4.10). Відбувається порівняння моменту опору на рульовому колесі  $M_{вод}$  та момент опору завдання. Отримана похибка керування подається до входу ПІД-регулятора, який генерує керуючий імпульс у вигляді логічної одиниці або нуля. Формування моменту опору завдання відбувається за рекомендованою залежністю представленою на рисунку 1.6, для забезпечення водієм відчуття дороги.

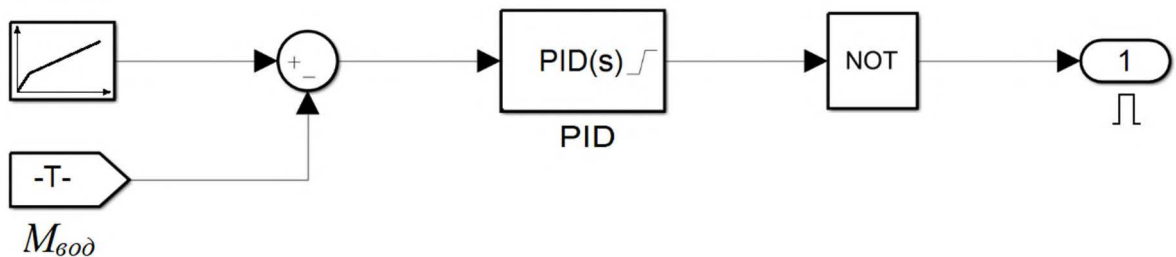


Рисунок 4.10 – Підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі у середовищі Matlab Simulink

На механічну частину рульового приводу під час повороту керованих коліс діє момент опору  $M_{он}$ . Його визначенням займається Simulink-модель представлена на рисунку 4.11.

Вхідними величинами моделі є кут повороту керованих коліс  $\Theta_{кк}$  та лінійна швидкість руху тролейбуса  $v_{трол}$ . Вихідним параметром є загальний момент опору повороту керованих коліс  $M_{он}$ .

В залежності від швидкості руху тролейбуса  $v_{трол}$  розраховується момент опору повороту шини  $M_{\phi}$  виходячи з рівнянь (3.23) – (3.33). Отримане

значення моменту опору помножується на два для отримання повного опору повороту (обох коліс).

Значення додаткових моментів, які впливають на загальний момент опору повороту керованих коліс тролейбуса  $M_{on}$  згідно з [75,139] визначається як  $M_{доd} = 0,15 \cdot M_{\phi max}$ .

До швидкості руху тролейбуса  $v_{трол} = 1$  м/с вважається, що момент опору повороту керованих коліс рівний моменту опору повороту на місці [75,139].

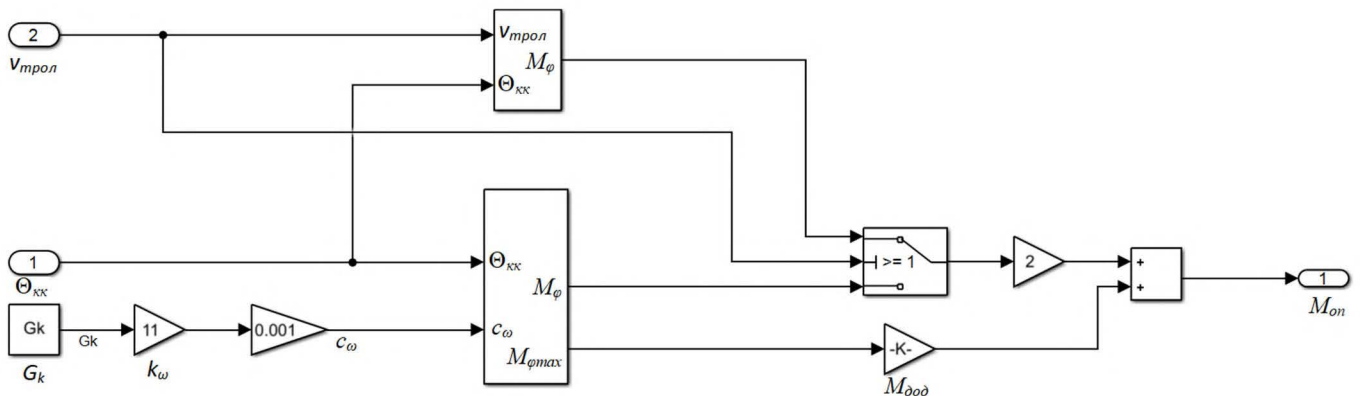


Рисунок 4.11 – Simulink-модель визначення моменту опору при повороті керованих коліс

У моделі визначення моменту опору повороту керованих коліс (див. рис. 4.11) враховуються характеристики підвіски ТЗ, а також вплив коефіцієнту тертя шини з дорожнім покриттям.

Кінематичні перетворення РМ відбуваються у блоці зображеному на рисунку 4.12. Даний блок на вхід приймає частоту обертання рульового колеса  $n_{вод}$ . Вихідними величинами є визначені значення частоти обертання завдання вихідного валу ДРК  $\omega_{завд}$ , а також розрахунок крутного моменту, який необхідно створювати водію  $M_{вод}$ .

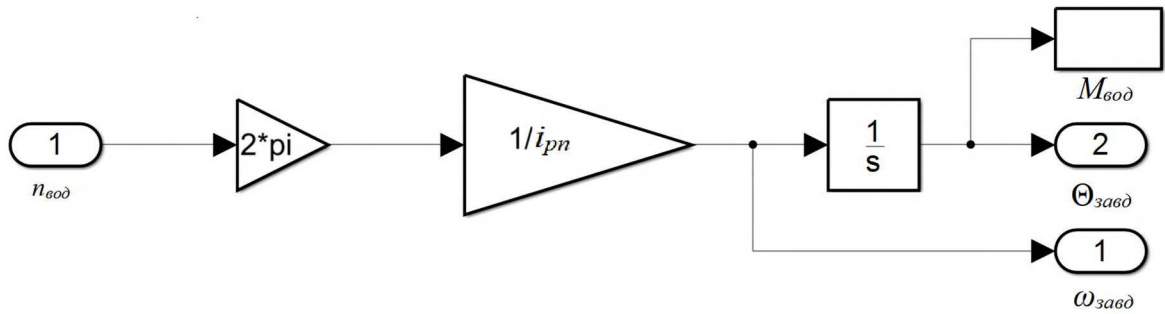


Рисунок 4.12 – Блок кінематичних перетворень РМ та визначення крутного моменту на рульовому колесі тролейбусу у середовищі Matlab Simulink

Підсистема визначення крутного моменту на рульовому колесі  $M_{вод}$  (див. рис. 4.13) призначена для імітація впливу водія на поворот керованих коліс. На вхід блок приймає значення кута повороту керованих коліс  $\Theta_{кк}$  та кута повороту завдання  $\Theta_{завд}$ .

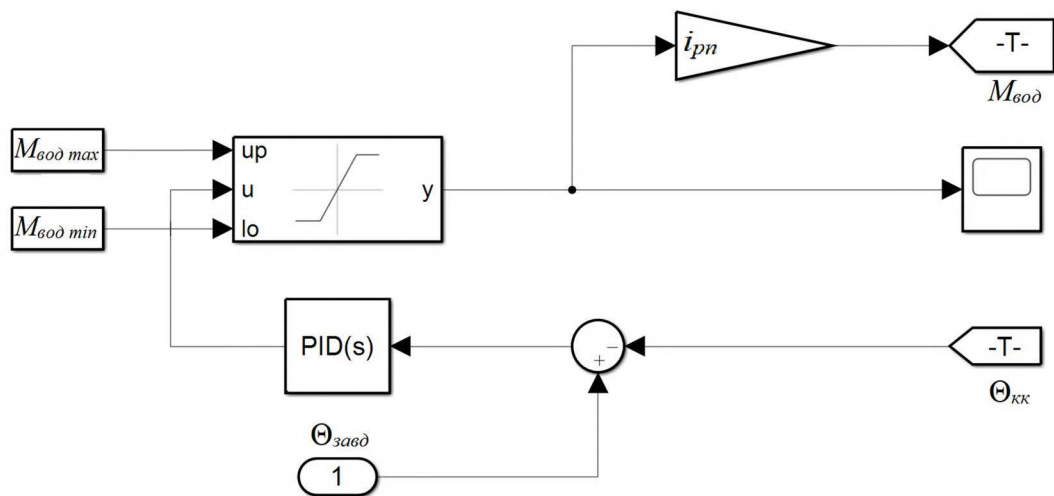


Рисунок 4.13 – Підсистема визначення крутного моменту на рульовому колесі у середовищі Matlab Simulink

За результатами обчислення похибки керування ПІД-регулятор створює керуючий вплив, який подається на вхід елемента динамічного насичення. Даний елемент також приймає на вхід максимальне та мінімальне значення крутного моменту, який має створювати водій ТЗ відповідно до [17]. Після чого крутний момент трансформується за допомогою коефіцієнту

передаточного відношення редуктора РП та подається до моделі механічної частини рульового приводу (див. рис. 4.6).

### 4.3 Моделювання роботи системи рульового керування тролейбусу

#### 4.3.1 Визначення початкових умов та припущень.

На основі визначених параметрів системи рульового керування тролейбусу (див. розділ 2) та розробленої імітаційної моделі можливо виконувати цифрові дослідження запропонованої системи при різних режимах роботи та умовах експлуатації.

Перед початком моделювання необхідно визначитися з початковими умовами (див. Додаток Г) та прийняти наступні припущення:

- магнітні системи кожної котушки полюсу 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;
- при повороті рульового колеса під час руху тролейбусу не враховуються момент рівнодіючої поздовжніх сил, швидкісний стабілізуючий момент, гіроскопічний момент;
- кути повороту лівого та правого колеса лінійно пов'язані з переміщенням сошки;
- радіальне навантаження та тиск у шинах постійний;
- люфти у механічних елементах при моделюванні не враховуються;
- взаємна кінематика тяг та шарнірів рульового керування та підвіски тролейбусу не впливає на перерозподіл сил, які впливають на момент опору повороту керованих коліс;

- коефіцієнт тертя між поверхнею шини та опорною поверхнею дорожнього покриття незмінний;
- деформація опорних поверхонь по яких котиться ротор ДРК при максимальних моментах не враховується;
- вплив вібрацій при роботі підсилювача не враховується;
- напруга живлення електричного двигуна не змінюється з часом.

4.3.2 Моделювання системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса на місці.

Використовуючи створену імітаційну модель (див. рис. 4.1) проведено моделювання роботи системи рульового керування тролейбусу при рівномірному обертанні водієм рульового колеса з максимально-допустимим навантаженням на вісь керованих коліс. При цьому тролейбус стоїть нерухомо на місці. Такі умови пороту вважаються найскладнішими, адже саме тут мають бути досягнуті максимальні механічні параметри підсилювача рульового приводу. Також даний режим експлуатації найбільш енергозатратний.

Аналіз властивостей рульового керування розглянутий у другому розділі дозволяє стверджувати, що кутова швидкість повороту рульового колеса водієм у середньому складає  $n_{вод} = 0,5$  об/с або  $\omega_{вод} = 3,14$  рад/с. При моделюванні напруга живлення високомоментного ДРК складає 400 В (див. п. 1.5). Час моделювання при цьому складає 2 с. Такий час моделювання дозволяє вийти на встановлений режим, який характеризується максимальним постійним моментом опору повороту керованих коліс. При цьому рульове колесо встигає зробити 1 оберт. Момент опору на рульовому колесі, при якому відбувається спрацювання підсилювача, складає  $M_{вод} = 50$  Н·м [17, 22]. Список використаних початкових параметрів налаштування для роботи імітаційної моделі наведено у Додатку Г.

За результатами моделювання отримано ряд часових характеристик, які представлені на рисунках 4.14 – 4.25. Отримані характеристики дають змогу оцінити характер роботи підсилювача РП та системи рульового керування тролейбусу.

На рисунку 4.14 представлена часова діаграма кута повороту керованих коліс та кута повороту завдання при обертанні водієм тролейбуса рульового колеса зі швидкістю  $\omega_{вод} = 3,14$  рад/с. З часової діаграми можна побачити, що кут повороту керованих коліс відстає від кута завдання.

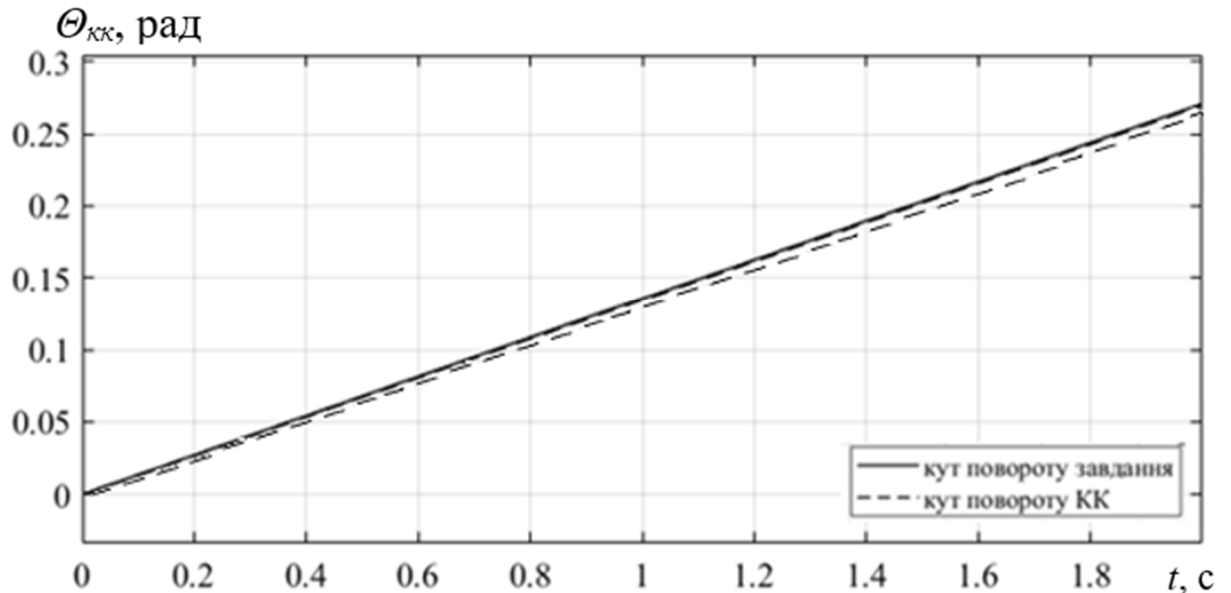


Рисунок 4.14 – Часова діаграма кута повороту керованих коліс тролейбусу та кута повороту завдання при рівномірному обертанні рульового колеса

Аналіз часової діаграми (див. рис. 4.15) показав, що кут повороту керованих коліс тролейбусу запізнюється на величину  $\Delta = 0,011$  рад ( $0,631^\circ$ ). Така поведінка системи пояснюється наявністю пружних ланок у РП, а також необхідністю системи керуванням підсилювачем підтримувати необхідний момент опору на рульовому колесі тролейбусу для забезпечення "відчуття дороги" водієм.



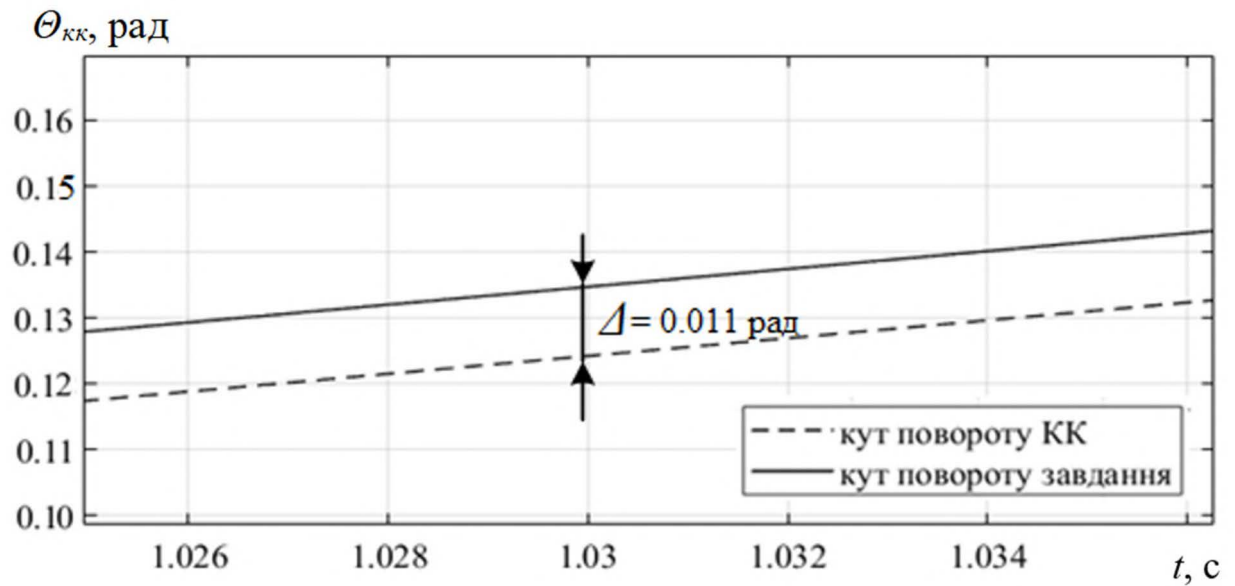


Рисунок 4.15 – Часова діаграма демонстрації запізнювання кута повороту керованих коліс тролейбусу від кута завдання при рівномірному обертанні рульового колеса

Момент опору на рульовому колесі під час повороту керованих коліс зображено на рисунку 4.16.

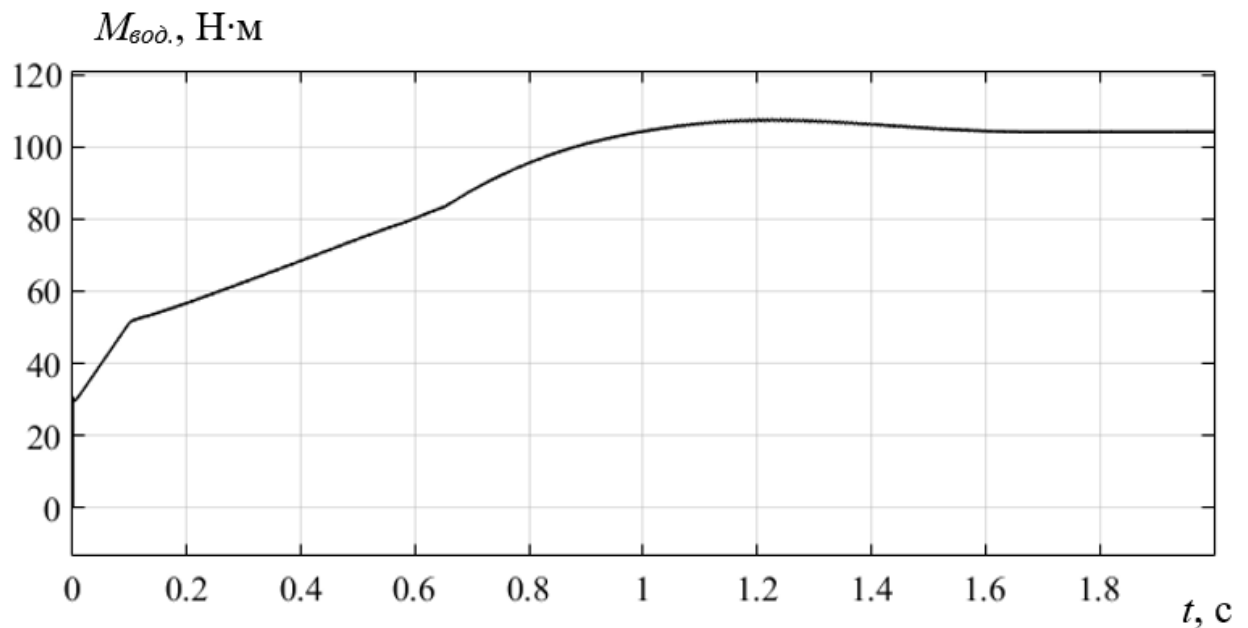


Рисунок 4.16 – Часова діаграма моменту опору на рульовому колесі при рівномірному обертанні рульового колеса

З наведеної часової діаграми (див. рис. 4.16) можна побачити, що для подолання моменту опору при повороті керованих коліс (див. рис. 4.17) слідкуюча система керування підсилювачем РП постійно намагається підтримувати зусилля на рульовому колесі відповідно до визначеної залежності (див. рис. 1.6) та вимог описаних у [17].

У початковий момент часу (див. рис. 4.16) можна побачити плавне зростання моменту опору на рульовому колесі, яке пропорційне моменту опору повороту керованих коліс (див. рис. 4.17). При досягненні моменту опору на рульовому колесі  $M_{\text{год}} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$  відбувається спрацювання підсилювача РП, що характеризується зміною нахилу характеристики (див. рис. 4.16). Значення моменту на рульовому колесі при максимальному моменті опору при повороті керованих коліс не перевищує  $M_{\text{год}} = 107 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , що відповідає вимогам стандарту [17].

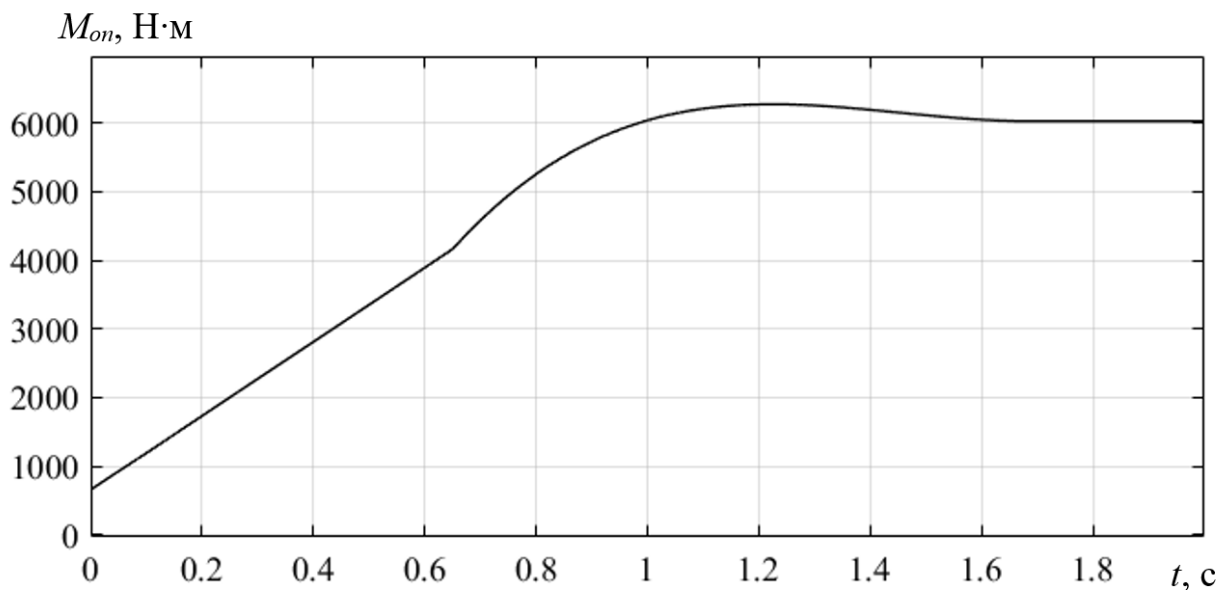


Рисунок 4.17 – Часова діаграма моменту опору повороту керованих коліс тролейбуса при рівномірному обертанні рульового колеса

Обертальний момент на валу ДРК зображено на рисунку 4.18. Максимальне значення обертального моменту для подолання моменту опору повороту керованих коліс складає  $M_{\text{ДРК}} = 3920 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

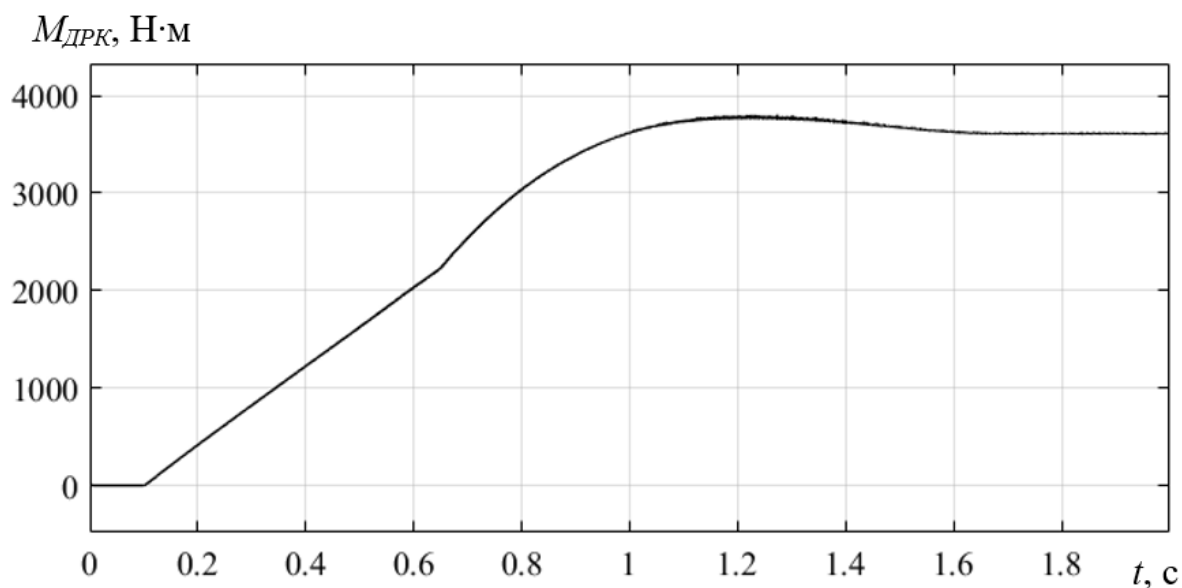


Рисунок 4.18 – Часова діаграма обертового моменту ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Часова діаграма модулю вектору СОМТ, яка створює обертовий момент на валу ДРК представлена на рисунку 4.19. При заданих умовах максимальне значення СОМТ складає  $F_{ДРК} = 18600$  Н·м.

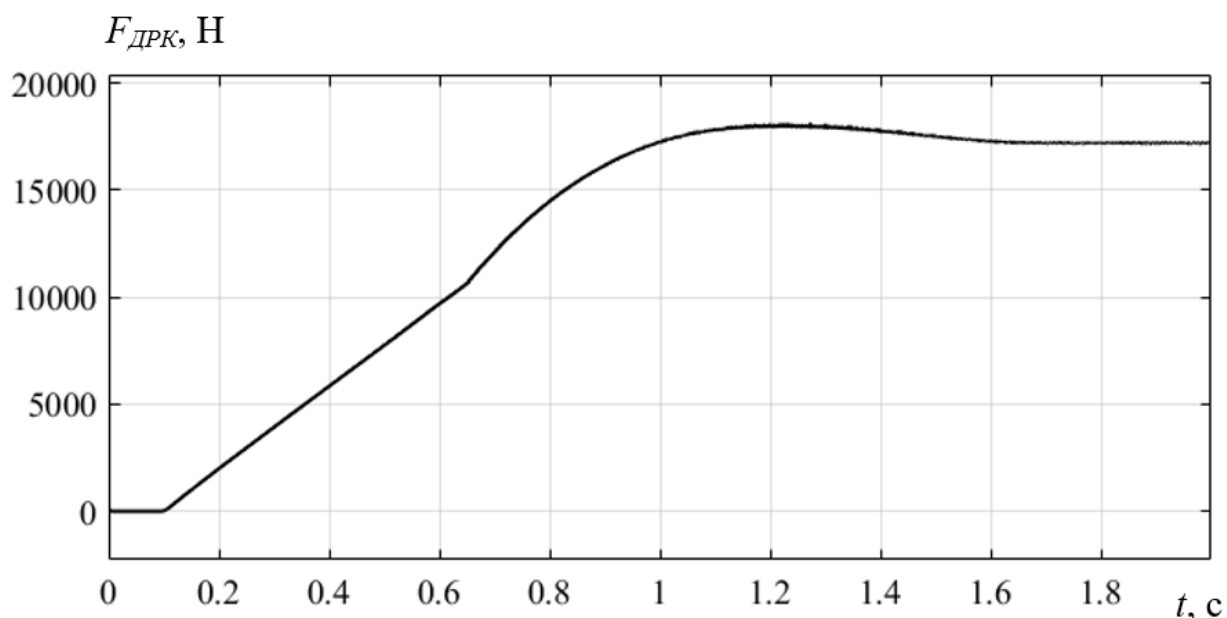


Рисунок 4.19 – Часова діаграма модулю вектору сили одностороннього магнітного тяжіння ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Для підтримання постійної частоти обертання вихідного валу при постійно зростаючому моменті опору повороту керованих коліс тролейбуса на валу ДРК створюється динамічний обертальний момент, який зображено на рисунку 4.20.

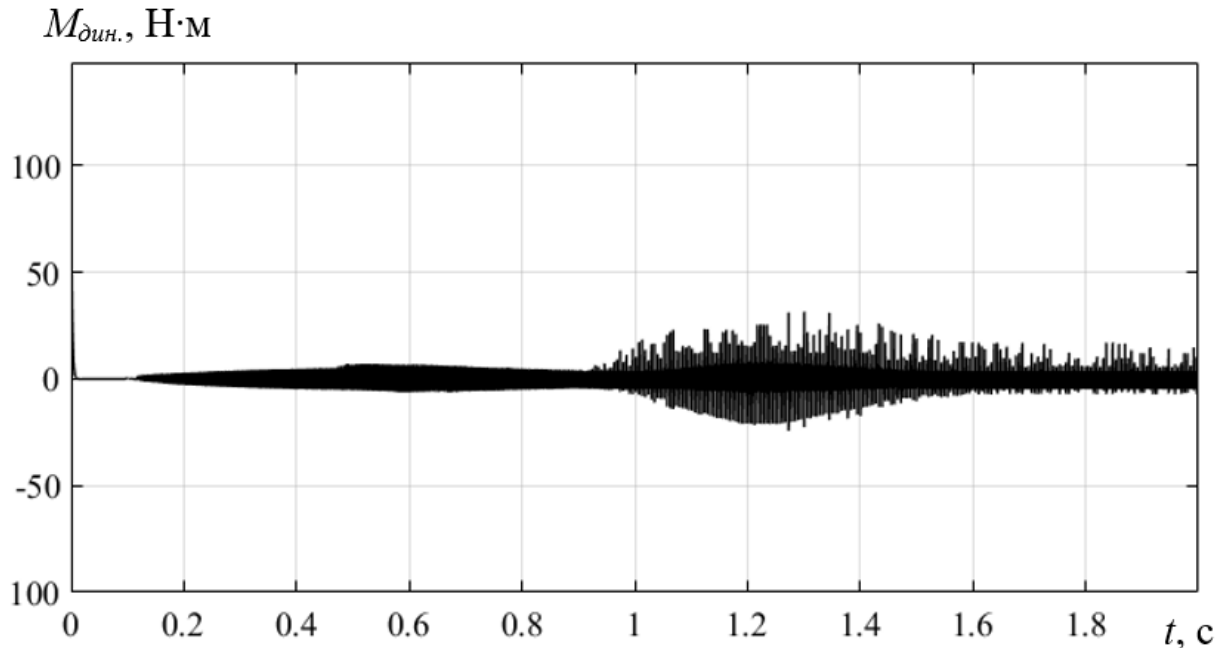


Рисунок 4.20 – Часова діаграма динамічного моменту на валу ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Однією з визначальних механічних характеристик рульового приводу системи рульового керування тролейбуса є частота обертання вихідного валу підсилювача рульового приводу.

Для системи рульового керування, що моделюється, при заданих умовах, часова діаграма частоти обертання вихідного валу ДРК матиме вигляд, представлений на рисунку 4.21.

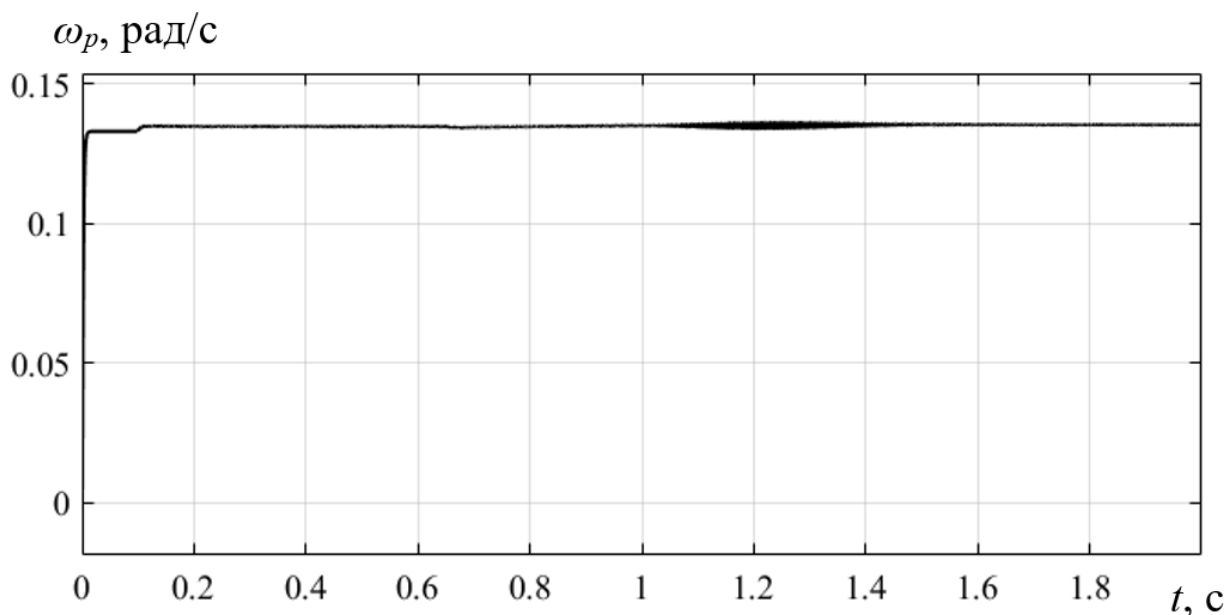


Рисунок 4.21 – Часова діаграма частоти обертання вихідного валу ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Аналіз часової діаграми (див. рис. 4.21) дозволив визначити, що у такому режимі ДРК характеризується стабільною частотою обертання на всьому проміжку часу моделювання. Відхилення від заданої частоти обертання не перевищують 0,02 рад/с, тобто не більше 10 %.

Для заданих умов моделювання струм котушки полюсу ДРК зображений на рисунку 4.22.

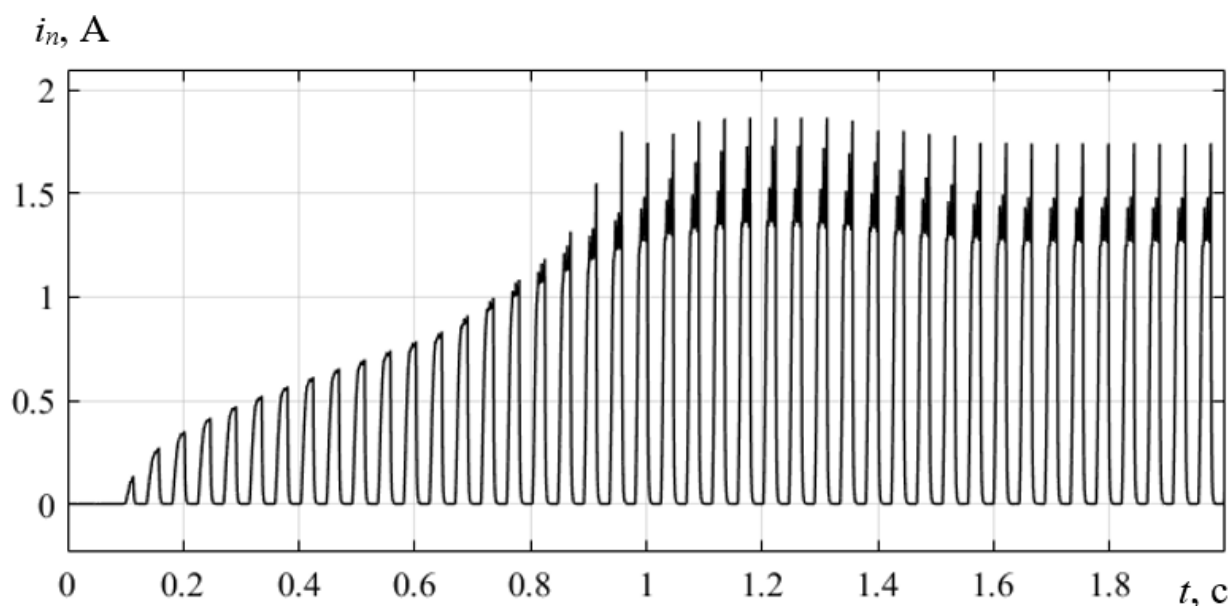


Рисунок 4.22 – Часова діаграма зміни струму котушки полюсу ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Аналіз часової діаграми (див. рис. 4.22) показує, що у кожен момент часу значення струму котушки статора стабілізується на рівні необхідному для створення обертового моменту на валу ДРК для подолання моменту опору повороту керованих коліс (див. рис. 4.17). При цьому значення струму у котушці, при максимальному моменті опору, знаходиться на рівні  $i_n = 1,5$  А.

На рисунку 4.23 зображено форму імпульсу струму котушки полюсу ДРК.

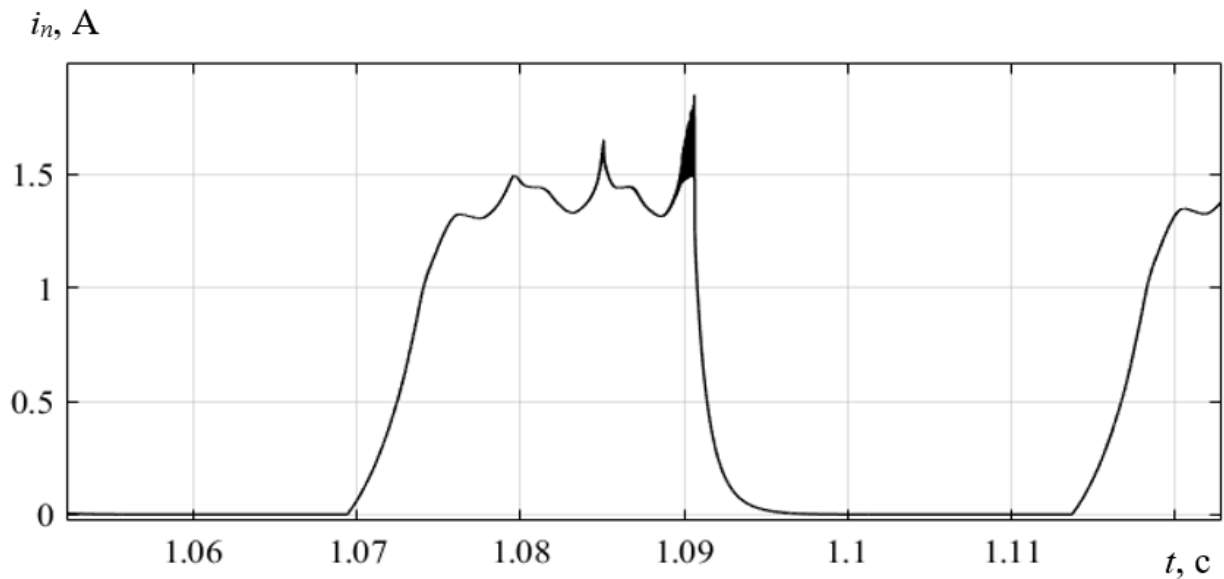


Рисунок 4.23 – Часова діаграма імпульсу струму котушки полюсу ДРК при рівномірному обертанні рульового колеса

Періодичність подачі напруги на котушки полюсів статора ДРК наведеною на рисунку 4.24. Момент подачі керуючих імпульсів визначається системою керування з урахуванням оптимальних кутів комутації для створення необхідного обертового моменту ДРК.

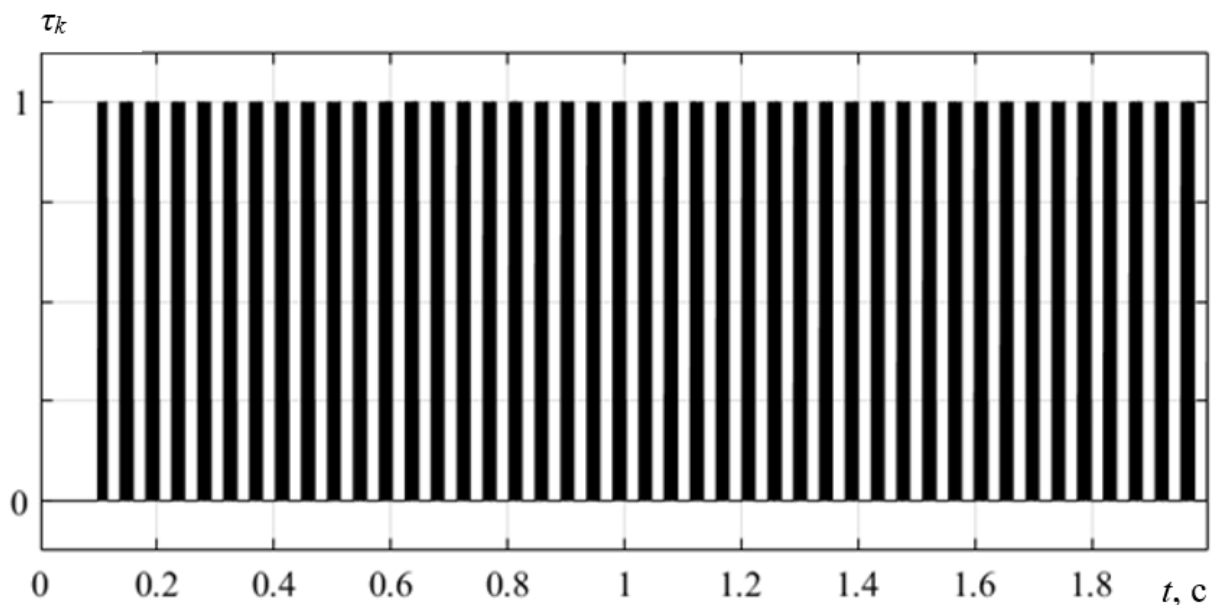


Рисунок 4.24 – Часова діаграма комутаційних імпульсів котушки полюса статора ДРК

На рисунку 4.25 зображена часова діаграма загального струму високомоментного ДРК при повороті керованих коліс тролейбусу.

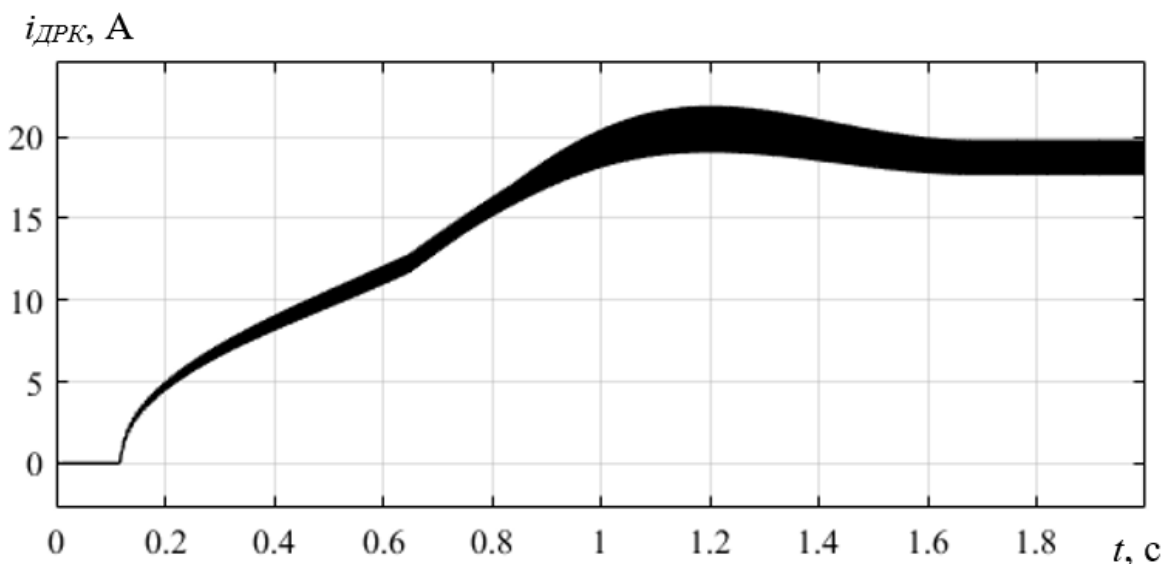


Рисунок 4.25 – Часова діаграма загального струму ДРК

Загальний струм визначається за рахунок сумування струмів усіх котушок статора за виразом  $i_{\text{ДРК}} = \sum i_n$ . Максимальний струм двигуна, за наведених умов моделювання, складає  $i_{\text{ДРК}} = 21$  А.

Враховуючи імпульсний характер споживання електричної енергії значення максимальної потужності ДРК визначається за наступним виразом:

$$P_{\max} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum u_j^{(t)} \cdot i_j^{(t)} dt, \quad (4.2)$$

де  $T$  – час моделювання, с;

$u_j^{(t)}$  – миттєва напруга  $j$ -ї котушки статора ДРК, В;

$i_j^{(t)}$  – миттєвий струм  $j$ -ї котушки статора ДРК, А.

Визначено, що за заданих умов моделювання максимальна потужність, яку споживає ДРК у системі рульового керування тролейбусу складає  $P_{\max} = 2800$  Вт.

4.3.3 Моделювання системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса.

Важливою властивістю системи рульового керування тролейбусу є швидкість реакції щодо динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса. Характер перехідних процесів під час такого виду обертання рульового колеса напряму впливає на безпеку руху.

В роботі проведено моделювання системи рульового керування тролейбусу при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса. Характер зміни частоти обертання рульового колеса водієм наведено на рисунку 4.26.

Під час моделювання навантаження на керуючу вісь прийнято максимально-допустимим для тролейбусу типу ЛАЗ-Е183D1. Зміна частоти обертання рульового колеса відбувається кожні 0,5 с часу моделювання та змінюється у широких межах. При моделювання напруга живлення високомоментного ДРК складає 400 В (див. п. 1.5). Час моделювання складає 2 с. Момент опору на рульовому колесі, при якому відбувається спрацювання підсилювача, складає  $M_{\text{вод}} = 50$  Н·м [17, 22]. Список



використаних початкових параметрів налаштування для роботи імітаційної моделі наведено у Додатку Г.

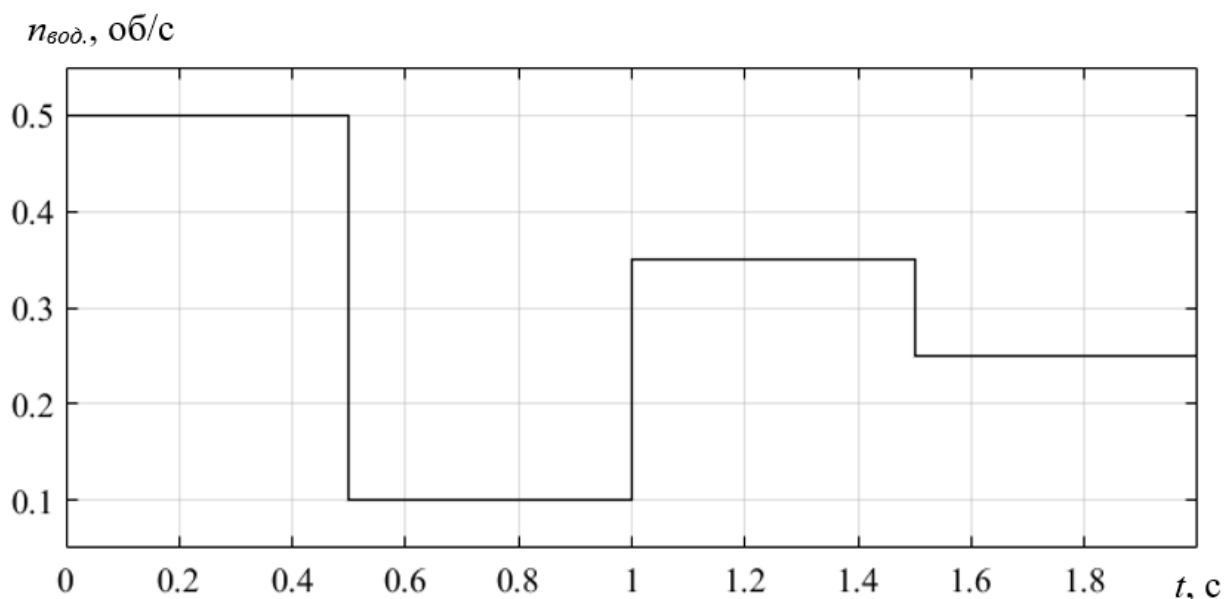


Рисунок 4.26 – Часова діаграма зміни частоти обертання рульового колеса тролейбусу

На рисунках 4.27–4.31 наведені часові діаграми результатів моделювання системи рульового керування.

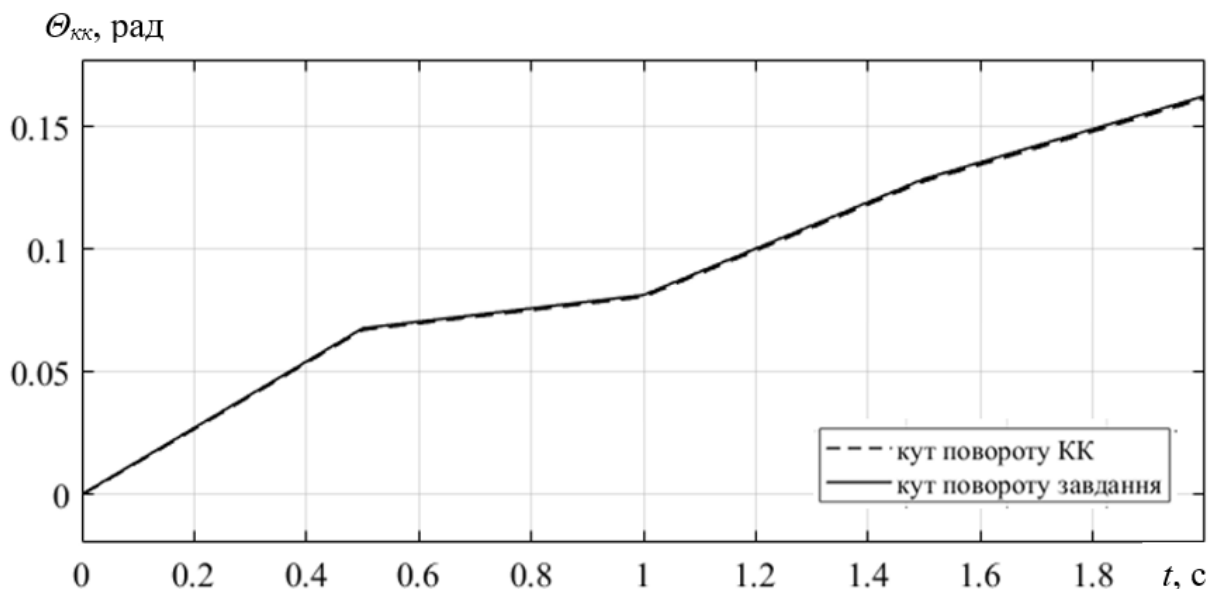


Рисунок 4.27 – Часова діаграма кута повороту керуючих коліс тролейбусу та кута повороту завдання при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса.

Аналіз часової діаграми (див. рис. 4.27) показав, що кут повороту керованих коліс відстає від кута завдання на всьому проміжку часу моделювання. При цьому похибка керування складає  $\Delta = 0,019$  рад ( $1,1^\circ$ ).

На рисунку 4.28 наведено часову діаграму моменту опору на рульовому колесі. Завданням системи керування є збереження необхідного моменту опору на рульовому колесі (визначеного залежністю на рис. 1.6 та стандартом [17]) у всьому діапазоні кутів повороту керованих коліс та частот обертання рульового колеса. На рисунку 4.28 можна побачити, що не зважаючи на різку зміну частоти обертання рульового колеса, момент опору рульового колеса залишається в границях допустимих значень відповідно до [17]. У моменти переходу між частотами обертання заданими за рисунком 4.26 помітні сплески моменту опору, однак система керування справляється із завданням підтримання оптимального моменту опору на рульовому колесі.

На рисунку 4.29 наведено часову діаграму обертового моменту на валу ДРК

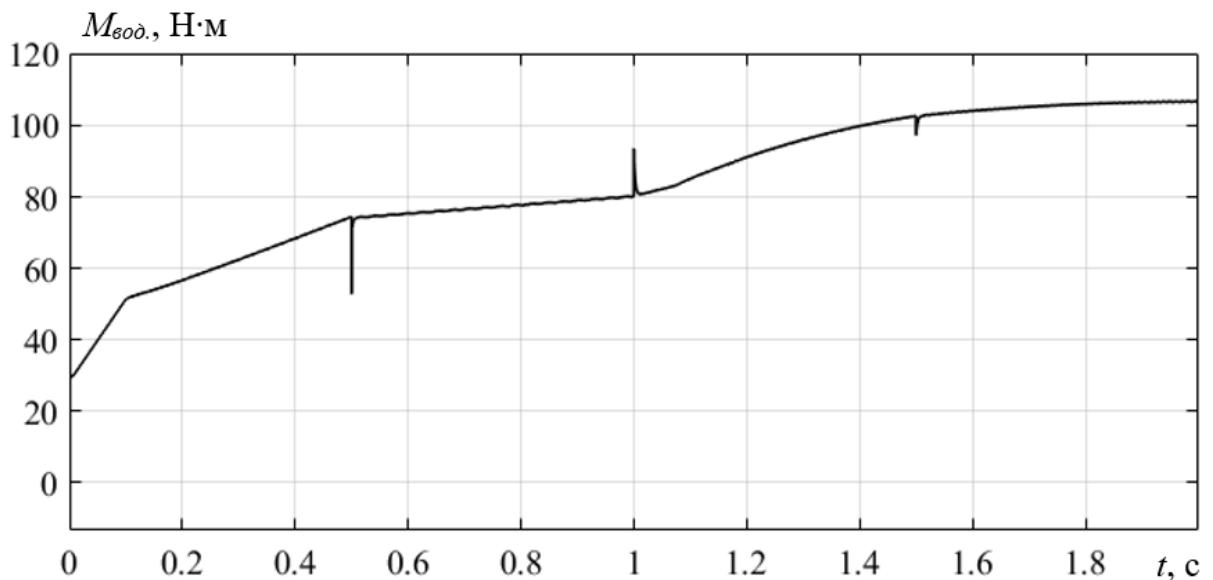


Рисунок 4.28 – Часова діаграма моменту опору на рульовому колесі при динамічній зміні частоти його обертання.

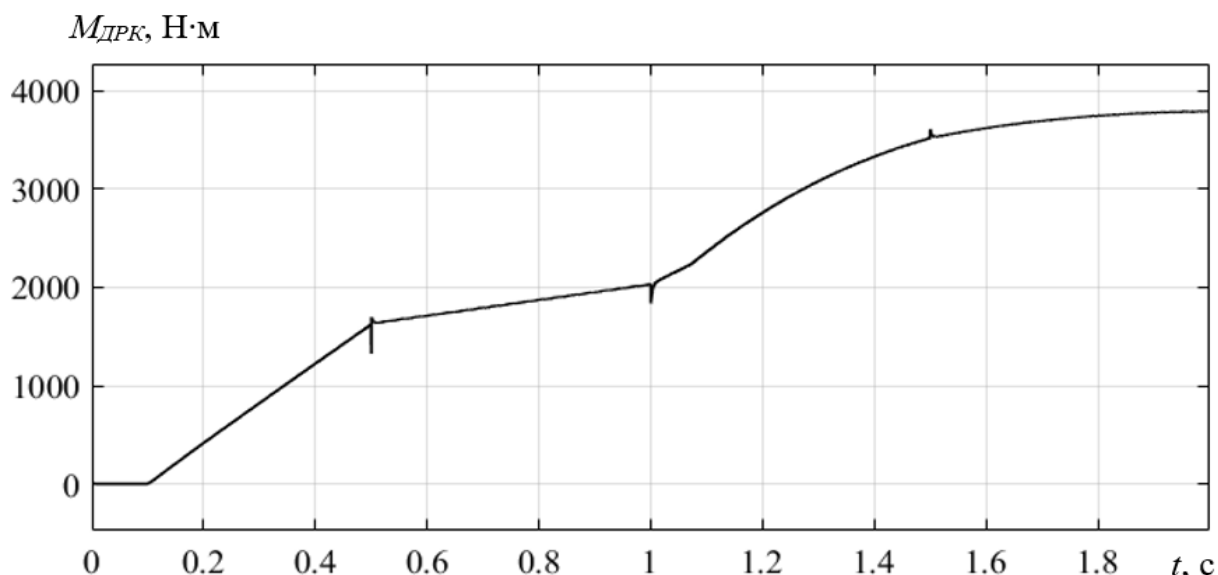


Рисунок 4.29 – Часова діаграма обертового моменту на валу ДРК при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса.

Струм у котушці полюса статора ДРК у такому режимі роботи зображено на рисунку 4.30. Загалом поведінка струму у котушці не відрізняється від такої при рівномірному обертанні рульового колеса (див. рис. 4.22). Але для забезпечення необхідної частоти обертання вихідного валу відзначається зміна часу та частоти комутації котушки полюсу статора ДРК.

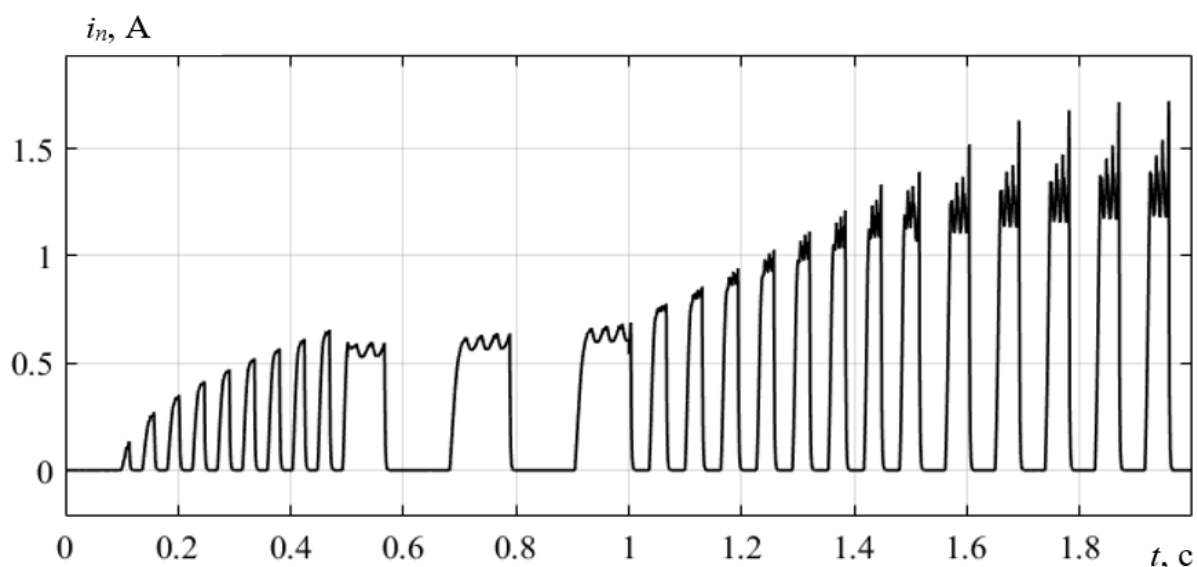


Рисунок 4.30 – Часова діаграма зміни струму котушки полюса статора ДРК при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса.

Часова діаграма частоти обертання вихідного валу ротора підсилювача РП на базі високомоментного ДРК зображена на рисунку 4.31. За наведеною характеристикою можна побачити, що перехідні процеси, пов'язані зі зміною частоти обертання вихідного валу ДРК, займають малі проміжки часу, що пояснюється відносно малим приведеним моментом інерції системи.

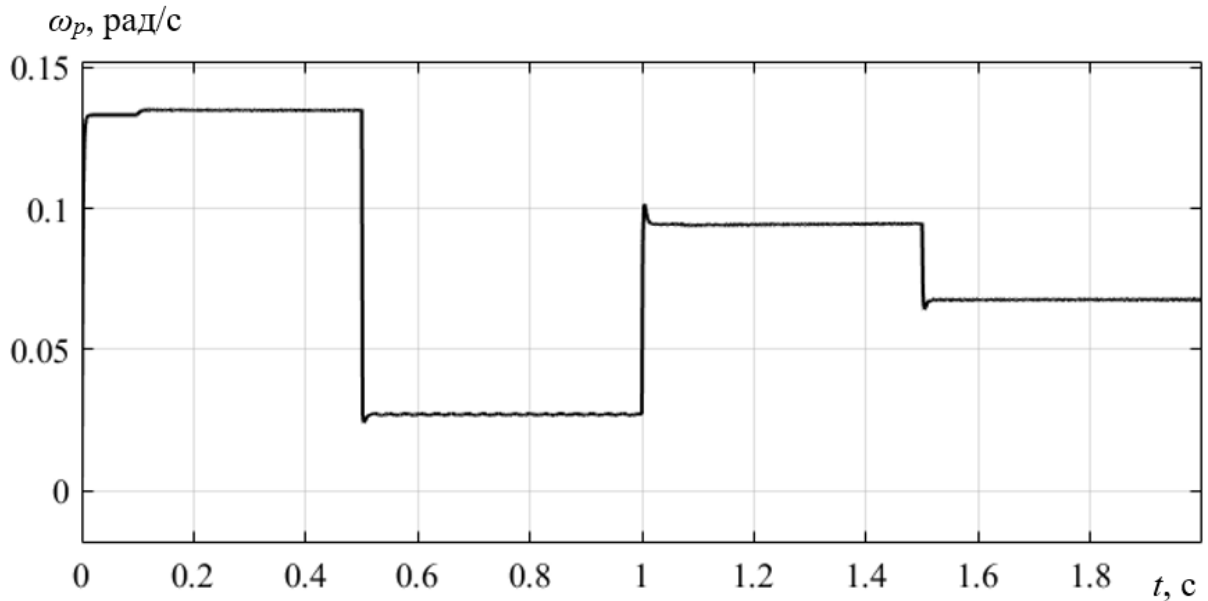


Рисунок 4.31 – Часова діаграма зміни частоти обертання вихідного валу ротора ДРК при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса.

За отриманими під час моделювання часовими діаграмами (рис. 4.27–4.31) визначено, що абсолютна похибка керування при динамічній зміні частоти обертання рульового колеса з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь складає  $\Delta = 0,019$  рад. При цьому час перехідного процесу у моменти різкої зміни частоти обертання рульового колеса не перевищує  $t_{пер.пр.} = 0,02$  с, що свідчить про малий приведений момент інерції системи.

#### 4.4 Оцінка ефективності електричного підсилювача рульового приводу.

##### 4.4.1 Дослідження енергоефективності електропідсилювача РП на базі ДРК.

Одним із режимів роботи підсилювача рульового керування тролейбусу є поворот керованих коліс під час руху ТЗ. Такий режим роботи характеризується зменшеним навантаженням на механічне обладнання рульового керування за рахунок зменшення моменту опору повороту керованих коліс [75]. Даний режим роботи представляє інтерес для дослідження оскільки він характеризується зниженим споживанням електричної енергії від мережі та займає значний проміжок часу під час реальної експлуатації тролейбусу [18, 19].

Розроблена імітаційна модель рульового керування тролейбусу (див. рис. 4.1) дозволяє проводити моделювання роботи підсилювача рульового приводу у широких діапазонах швидкості руху тролейбусу. Імітаційна модель є дещо спрощеною та не враховує частину моментів, які створюються під час руху тролейбусу та впливають на керовані колеса оскільки для їхнього розрахунку не має однозначних залежностей [75].

Визначення електричної потужності, що споживається підсилювачем рульового приводу тролейбусу на базі ДРК під час руху ведеться для діапазону дискретних значень швидкостей руху від 1 м/с до 5 м/с з кроком 0,2 м/с. При цьому на кожному кроці зміни швидкості руху тролейбуса відбувається зміна частоти обертання рульового колеса тролейбусу в діапазоні від 0,2 об/с до 0,65 об/с (1,91 рад/с ... 6,2 рад/с) з кроком 0,05 об/с (0,48 рад/с). Максимальна швидкість обертання рульового колеса, яка складає 0,65 об/с, є максимальною теоретично можливою згідно [18, 75–87] для вантажного або пасажирського транспорту великої місткості при нормальних умовах експлуатації. На кожному кроці визначається споживаний струм з мережі, розраховується за відомою залежністю (4.2) потужність, що споживається

підсилювачем РП на базі ДРК. Моделювання проводиться при максимально-допустимому навантаженні на керовану вісь тролейбуса. Результати моделювання зведені у таблицю, наведену у Додатку Г.

Результати моделювання представляють з себе набір дискретних значень. Для оцінки отриманих результатів проведено апроксимацію кубічними інтерполяційними сплайнами (методика інтерполяції розглянута у розділі 2) значень споживаної електричної потужності з мережі. В результаті чого отримано залежність, представлену на рисунку 4.32, яка дає змогу оцінити потужність, що споживає високомоментний ДРК у системі рульового керування в залежності від швидкості руху тролейбуса та частоти обертання рульового колеса.

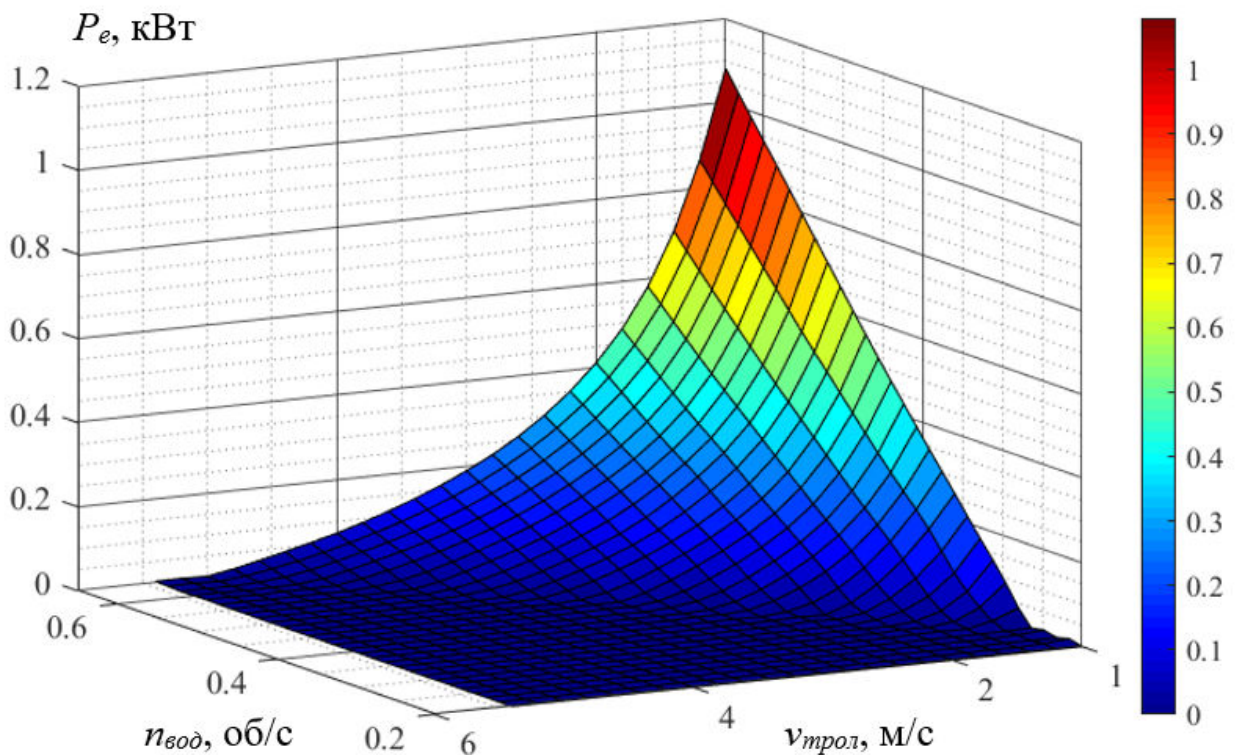


Рисунок 4.32 – Характеристика миттєвої споживаної електричної потужності ДРК під час руху тролейбуса

Отримана залежність (рис. 4.32) показує характерне зменшення споживаної потужності електричним підсилювачем рульового приводу тролейбуса при збільшенні лінійної швидкості руху рухомого складу. При цьому на швидкостях більших за  $v_{прол} = 5$  м/с при максимальній частоті обертання рульового колеса  $n_{вод} = 0,65$  об/с споживання електричної енергії двигуном взагалі відсутнє. Загалом зменшення частоти обертання рульового колеса та/або збільшення швидкості руху тролейбуса знижує споживану потужність підсилювача рульового приводу тролейбуса, що впливає на енергоефективність системи рульового керування.

4.4.2 Порівняльний аналіз споживання електричної енергії гідравлічного підсилювача РП з електричним підсилювачем РП на базі ДРК.

Для проведення порівняльного аналізу рівня споживання електричної енергії запропонованого електричного підсилювача рульового приводу з гідравлічним, у роботі пропонується провести моделювання роботи підсилювача на маршруті руху тролейбуса. У якості базової моделі тролейбуса обрано ЛАЗ-Е183D1 (або його модифікації).

Типовим режимом руху на маршруті тролейбуса є рух від зупинки до зупинки. У якості еталону у роботі обрано перегон «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» тролейбусних маршрутів №2 та № 18 м. Харкова (див. рис. 4.33).

На схемі перегону «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» (див. рис. 4.33), що по проспекту Науки пролягає дорога, яка має дві смуги руху в кожному напрямку. При під'їзді до регульованого перехрестя з вулицею Отакара-Яроша, дорога розгалужується на 3 полоси для руху у кожному напрямку, а також по центру дороги з'являється роздільна смуга. На перегоні біля зупинки вул. Тобольська є відкрита «кишеня». Це зроблено для безпечної та зручної посадки (висадки) пасажирів на зупинці. Довжина перегону складає 410 м.

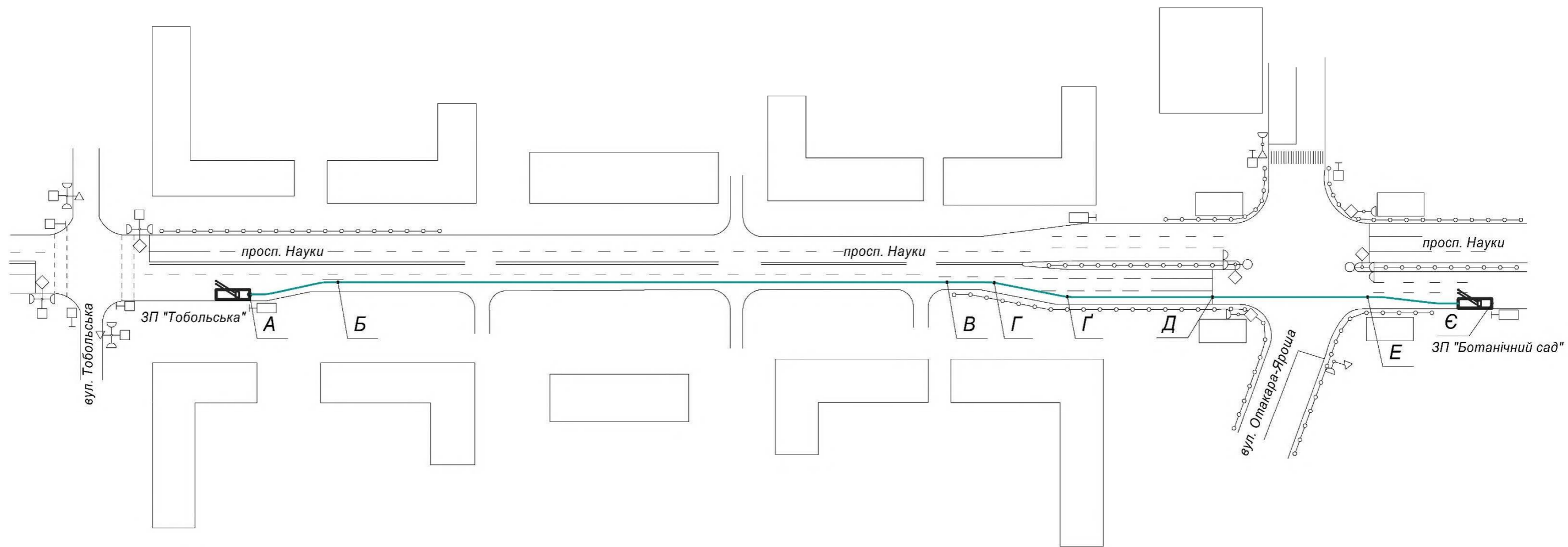


Рисунок 4.33 – Схема перегону «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» тролейбусних маршрутів №2 та № 18 м. Харкова



Порядок руху на перегоні наступний. З точки А (див. рис. 4.33) відбувається початок руху тролейбусу від зупиночного пункту «Тобольська». При цьому для забезпечення плавності руху, прискорення на ділянці від точки А до точки Б складає  $a_{\text{трол}} = 0,5 \text{ м/с}^2$ . З виходом на прямолінійну ділянку траєкторії від точки Б до точки В тролейбус продовжує рух з прискоренням  $a_{\text{трол}} = 1 \text{ м/с}^2$  до моменту, коли його швидкість не стає рівною  $v_{\text{трол}} = 7 \text{ м/с}$ . Після чого тролейбус рухається рівномірно. На ділянці де дорога розгалужується на 3 смуги тролейбус, враховуючи конфігурацію контактної мережі, має зайняти крайню праву смугу. Тому при під'їзді до розгалуження дороги на ділянці від точки В до точки Г (див. рис. 4.33) тролейбус знижує швидкість з уповільненням  $a_{\text{трол}} = -0,7 \text{ м/с}^2$ . Після чого виконує маневр перестроювання. На ділянці маршруту між точками Г та Г' тролейбус продовжує уповільнюватися до швидкості  $v_{\text{трол}} = 4 \text{ м/с}$  для забезпечення плавного виходу на прямолінійну ділянку.

При під'їзді до перехрестя тролейбус зупиняється у точці Д на забороняючий сигнал світлофору (див. рис. 4.33). Середній час простою на подібних регульованих перехрестях складає  $t_{\text{пр}} = 30 \text{ с}$ . На дозволяючий сигнал світлофору тролейбус прискорюється до швидкості  $v_{\text{трол}} = 5 \text{ м/с}$  та перетинає перехрестя.

Під'їжджаючи до зупиночного пункту «с/м "Ботанічний сад"» тролейбус у точці Е починає плавно уповільнюватися до повної зупинки на зупиночному пункті у точці Є. При цьому зміщаючись по траєкторії (див. рис. 4.33) максимально вправо до границі проїжджої частини.

Графік швидкості тролейбусу на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» представлений на рисунку 4.34

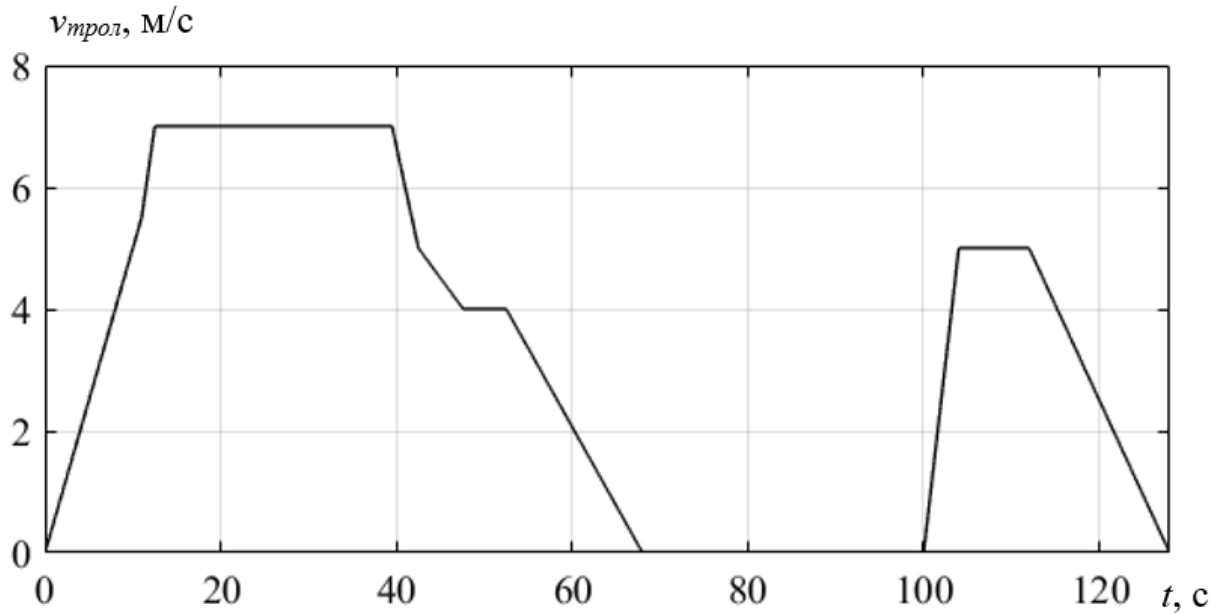


Рисунок 4.34 – Часова діаграма швидкості руху тролейбусу на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"»

Під час руху на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» споживання електричної енергії стандартним гідропідсилювачем рульового приводу тролейбусу ЛАЗ-Е183D1 матиме вигляд представлений на рисунку 4.35.

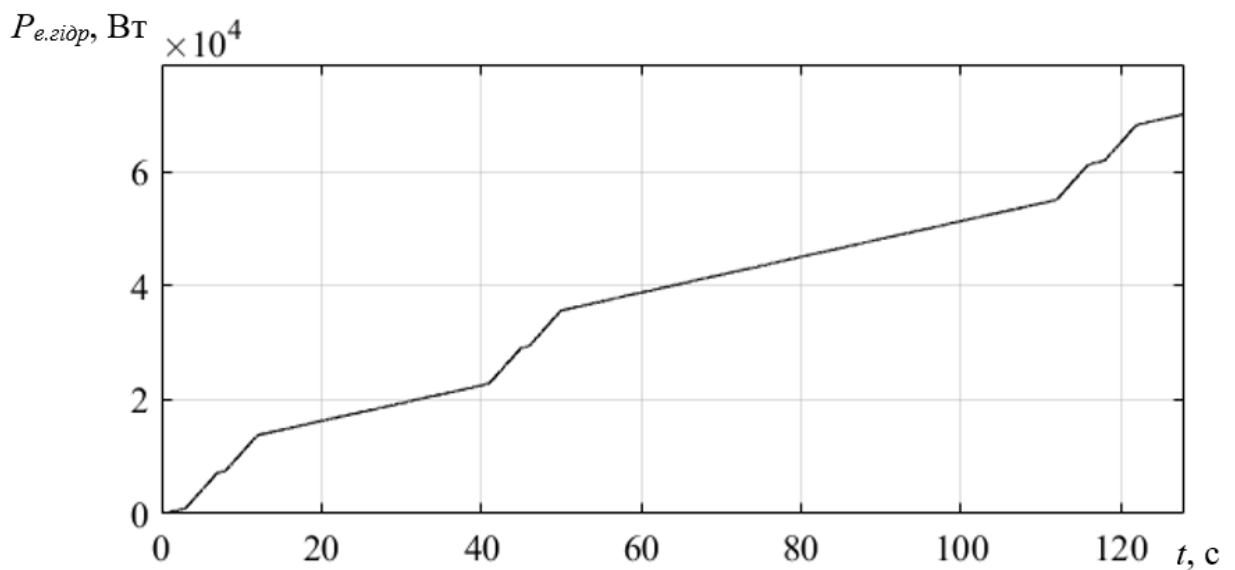


Рисунок 4.35 – Часова діаграма споживання електричної енергії двигуном гідронасосу гідропідсилювача рульового приводу тролейбуса ЛАЗ-Е183D1 на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"»

З часової діаграми видно, що електричний двигун приводу гідронасосу постійно споживає енергію з мережі. У моменти, коли необхідно створювати додаткове зусилля при повороті керованих коліс, рівень споживання електричної енергії збільшується. Це характеризується збільшенням кута нахилу характеристики (див. рис. 4.35).

У роботі проведено моделювання споживання електричної енергії підсилювача РП на базі ДРК на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» тролейбусних маршрутів м. Харкова. За результатами моделювання отримана часова діаграма споживання електричної енергії (див. рис. 4.36).

З часової діаграми (див. рис. 4.36) можна побачити, що електричний підсилювач РП тролейбусу на базі ДРК споживає електричну енергію з мережі лише у моменти коли необхідно створювати додаткове зусилля для подолання моменту опору повороту керованих коліс. У моменти простою наприклад на зупиночних пунктах або на світлофорних об'єктах споживання енергії не відбувається, на відміну від гідравлічного підсилювача, який постійно споживає частину енергії для створення мінімального тиску у гідросистемі для нормальної роботи.

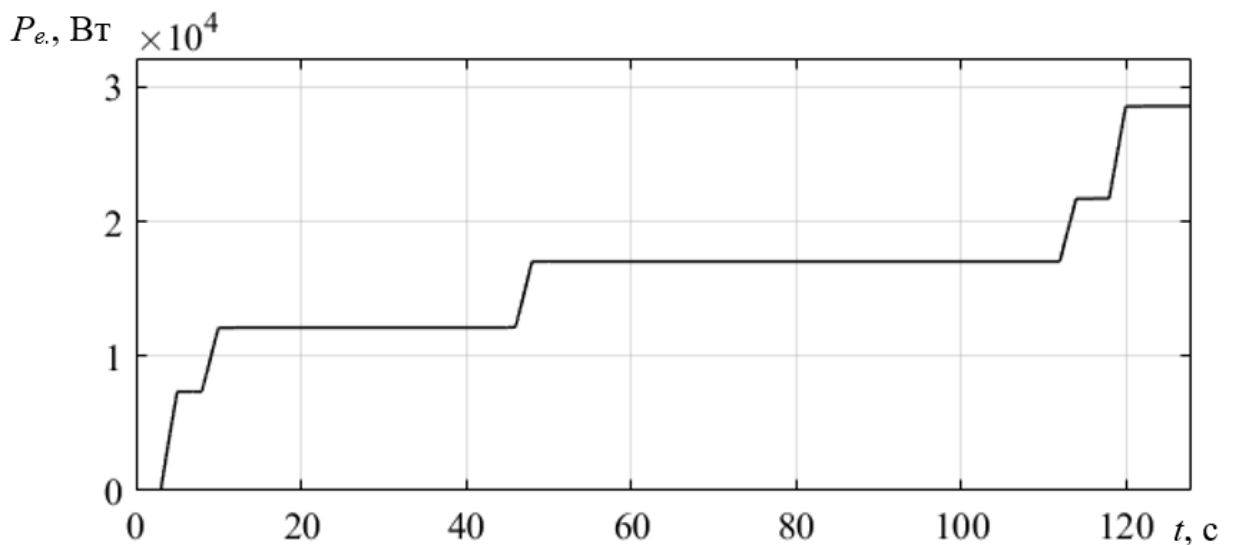


Рисунок 4.36 – Часова діаграма споживання електричної енергії підсилювачем РП на базі ДРК на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"»

За результатами моделювання визначено, що під час роботи підсилювача рульового приводу на базі ДРК, у порівнянні з гідравлічним підсилювачем, який встановлено на тролейбусі ЛАЗ-Е183D1 (враховуючи рух на перегоні «Тобольська – с/м "Ботанічний сад"» тролейбусних маршрутів №2 та №18 м. Харкова), споживання електричної енергії зменшилося з 2,1563 МДж (0,598 кВт·год) до 0,8565 МДж (0,237 кВт·год) – на 60,4% за рахунок відсутності споживання енергії на прямих ділянках руху тролейбуса та у моменти простою на зупиночних пунктах або регульованих перехрестях. Економія електроенергії на рік при цьому може сягати до 4680 МДж (1,3 МВт·год).

#### **4.5 Рекомендації щодо застосування підсилювача РП на базі ДРК у конструкції сучасних тролейбусів.**

Особливістю запропонованого науково-технічного рішення є можливість модернізації відомих систем рульового керування більшості сучасних тролейбусів без суттєвих переробок конструкції (див. підрозділ 2.5) рульового приводу.

Для забезпечення надійної експлуатації розроблені рекомендації щодо його застосування. Враховуючи підвищені вимоги надійності щодо системи рульового керування, для забезпечення її безперервної роботи при раптовому зникненні напруги у контактній мережі, електропідсилювач РП на базі ДРК рекомендується встановлювати на сучасні тролейбуси з системами автономного ходу середньої та великої дальності. За відсутності таких систем у складі тролейбусу необхідно забезпечити наявність аварійного модулю з DC-DC перетворювачем. Даний аварійний модуль забезпечує перетворення напруги бортової мережі 24 В до рівня напруги живлення 400 В. При цьому важливо забезпечити вільний доступ до системи керування електричним підсилювачем з можливістю підключення діагностичного роз'єму, що особливо важливо під час огляду рухомого складу перед випуском на лінію.

Враховуючи високу номінальну напругу живлення підсилювача РП на базі ДРК усі роботи з діагностики та обслуговування необхідно проводити відповідно до «Правил експлуатації трамвая і тролейбуса».

Виходячи з розташування електропідсилювача у підкузовному просторі тролейбусу особливу увагу необхідно приділяти пиле- та вологостійкості усіх роз'ємів пов'язаних з системою керування, з групою датчиків та живленням. Важливо проводити сезонну ревізію направляючих ротора ДРК, а також пильників для запобігання зниження рівня герметичності вузлів електропідсилювача. Таке рішення має на меті зниження ризиків підвищеного зносу рухомих елементів в результаті потрапляння на них абразивних матеріалів та захист від корозії.

За рахунок ексцентричного розташування ротора під час роботи електропідсилювача РП на базі ДРК створюється певний рівень вібрацій. Тому для підвищення рівня комфорту у салоні тролейбуса рекомендується використовувати віброгасники у точках кріплення електропідсилювача до рами.

Перед випуском на лінію окрім візуального огляду елементів системи рульового керування під час перевірки працездатності підсилювача рульового приводу важливим аспектом є контроль зусилля на рульовому колесі. За рахунок наявності датчиків крутного моменту у конструкції електроприводної системи (див. розділ 2) запропонованого науко-технічного рішення зусилля на рульовому колесі може бути визначено за допомогою діагностичного стенду.

Для підвищення рівня економії електричної енергії рекомендується контролювати рівень тиску у шинах керованих коліс. Оптимальний тиск у шинах тролейбусу знижує момент опору повороту керованих коліс за рахунок зменшення площі контактної відбитку, що знижує рівень споживання електричної енергії двигуном.

Спрощення конструкції підсилювача РП за рахунок впровадження запропонованого науково-технічного рішення дозволяє зменшити час та об'єм регламентних робіт у депо перед випуском тролейбуса на лінію. Це позитивно

відображається на раціональному використанні ресурсів підприємства та покращує рівень якості обслуговування МЕТ.

#### Висновки за розділом 4

1. Розроблено імітаційну модель системи рульового керування тролейбусу з електричним підсилювачем РП на базі ДРК, яка дозволяє проводити дослідження електромеханічних та енергетичних характеристик системи відповідно щодо факторів обумовлених умовами та режимами руху. Імітаційна модель враховує специфіку зміни моменту опору при повороті керованих коліс та особливості роботи ДРК. За допомогою додатку Simulink Response Optimization визначено параметри ПД-регуляторів імітаційної моделі.

2. За результатами проведеного моделювання системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК встановлено, що:

– при повороті керованих коліс на місці, з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс складає  $\Delta = 0,011$  рад. Момент опору на рульовому колесі при цьому не перевищує  $M_{\text{вод}} = 107$  Н·м. Обертання вихідного валу двигуна характеризується стабільною частотою обертання на всьому проміжку часу моделювання. Відхилення від заданої частоти обертання не перевищують  $0,02$  рад/с, тобто не більше  $10\%$ . Максимальний споживаний струм електричного підсилювача керма у такому режимі складає  $i_{\text{ДРК}} = 21$  А. При цьому максимальна споживана потужність не перевищує  $P_{\text{max}} = 2800$  Вт.

– при повороті керованих коліс з динамічною зміною частоти обертання рульового колеса, з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс не перевищує  $\Delta = 0,019$  рад. При цьому час перехідного процесу при зміні частоти обертання вихідного валу двигуна не перевищує  $t_{\text{пер.пр.}} = 0,02$  с.

3. Встановлено, що максимальна потужність яку споживає електропідсилювач на базі ДРК, на швидкостях руху тролейбусу близьких до  $v_{трол} = 1$  м/с та швидкості обертання рульового колеса  $n_{вод} = 0,65$  об/с, складає  $P_{max} = 1080$  Вт. На швидкостях руху більших за  $v_{трол} = 5$  м/с у всьому діапазоні можливих частот обертання рульового колеса споживання електричної енергії не відбувається. Зменшення частоти обертання рульового колеса та/або збільшення швидкості руху тролейбусу призводить до зменшення споживаної потужності.

4. За результатами порівняльного аналізу визначено, що за рахунок використання електричного підсилювача РП на базі ДРК споживання електричної енергії зменшилося з 2,1563 МДж (0,598 кВт·год) до 0,8565 МДж (0,237 кВт·год) – на 60,4% за рахунок відсутності споживання енергії на прямих ділянках руху тролейбусу та у моменти простою на зупиночних пунктах або регульованих перехрестях. Річна економія електроенергії при цьому може сягати до 4680 МДж (1,3 МВт·год).

5. Розроблені рекомендації щодо застосування електричного підсилювача РП на базі ДРК у конструкції сучасних тролейбусів, що використовуються на підприємствах МЕТ України.

Ряд результатів дослідження представлених у розділі було опубліковано у наукових працях [4] – [5].

## ВИСНОВКИ

Таким чином у дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу дослідження та удосконалення системи рульового керування тролейбусу для підвищення його ефективності та експлуатаційних характеристик за рахунок використання електричного підсилювача рульового приводу на базі двигуна з ротором що котиться.

1. Проведено аналіз сучасних та перспективних конструкцій підсилювачів рульового приводу транспортних засобів. За результатами аналізу визначено, що основним типом підсилювача рульового приводу, який застосовується на рухомому складі МЕТ є гідравлічний. Основною проблемою підсилювачів даного типу є їх низька енергоефективність. Це насамперед пов'язано з тим, що для забезпечення нормальної роботи підсилювача, електричний двигун приводу гідронасосу повинен постійно підтримувати тиск у гідросистемі, навіть тоді коли створювати додаткове зусилля для повороту керованих коліс не потрібно.

2. Вперше запропоновано науково-технічне рішення, що сприяє підвищенню енергоефективності та експлуатаційних характеристик рульового керування тролейбусу за рахунок використання у якості підсилювача рульового приводу високомоментного електричного двигуна з ротором що котиться.

3. Обґрунтовані методи та засоби дослідження роботи рульового приводу тролейбуса з електричним підсилювачем керма. Доведено доцільність використання двигуна з ротором що котиться.

4. Визначено основні параметри тролейбусу та підвіски його керованих коліс, які необхідні для розрахунку підсилювача рульового приводу та дослідження системи рульового керування. За спрощеною методикою проведено розрахунок ДРК за результатами якого визначені геометричні параметри магнітопроводу статора та ротора двигуна, визначено номінальний



електромагнітний момент, кількість полюсів, номінальний струм котушки полюсу, номінальну частоту обертання вихідного валу двигуна.

5. Удосконалено метод визначення магнітних та механічних параметрів ДРК, особливістю якого є використання методу скінченних елементів в плоско-паралельній постановці задачі для розрахунку магнітного поля полюсів двигуна; проведення регресійного аналізу за допомогою апроксимації інтерполяційними кубічними сплайнами з подальшим обчисленням поточкозчеплення, диференціальної індуктивності, коефіцієнту проти-ЕРС, радіальної і тангенціальної складових магнітної сили.

6. Запропоновано концепцію удосконалення системи рульового керування тролейбусу. Перевагою запропонованої концепції є те, що вона дозволяє без суттєвих змін у конструкції рульового керування відомих тролейбусів проводити модернізацію підсилювача рульового приводу з покращенням його експлуатаційних характеристик.

7. Удосконалено математичну модель рульового керування тролейбусу, особливістю якої є врахування масогабаритних характеристик та швидкості руху тролейбусу, геометричних параметрів рульового приводу, моменту опору при повороті керованих коліс, а також попередньо розрахованих, методом скінченних елементів, електромагнітних та механічних параметрів ДРК. Розроблені структурні та функціональні схеми рульового керування з електропідсилювачем РП тролейбусу на базі ДРК.

8. Розроблена імітаційна модель рульового керування тролейбусу, яка дозволяє проводити дослідження роботи електричного підсилювача РП на базі ДРК відповідно щодо факторів обумовлених умовами та режимами руху.

9. За результатами моделювання системи рульового керування тролейбусу з підсилювачем РП на базі ДРК визначено, що:

– при повороті керованих коліс на місці, з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс складає  $\Delta = 0,011$  рад. Момент опору на рульовому колесі при цьому не перевищує  $M_{\text{вод}} = 107$  Н·м. Відхилення від

заданої частоти обертання вихідного валу ДРК складає не більше 10 %. Максимальний струм електричного підсилювача за таких умов не перевищує  $i_{ДРК} = 21$  А, а максимальна потужність  $P_{\max} = 2,8$  кВт.

– при повороті керованих коліс з динамічною зміною частоти обертання рульового колеса, з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь, абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує  $\Delta = 0,019$  рад. При цьому, час перехідного процесу у моменти зміни частоти обертання вихідного валу двигуна складає  $t_{пер.пр.} = 0,02$  с.

– при швидкостях руху близьких до  $v_{трол} = 1$  м/с та частоті обертання рульового колеса  $n_{вод} = 0,65$  об/с, максимальна потужність підсилювача не перевищує  $P_{\max} = 1,1$  кВт. За рахунок зменшення частоти обертання рульового колеса та/або збільшення швидкості руху тролейбусу відбувається зниження рівня споживання електричної енергії. При цьому на швидкостях руху більших за  $v_{трол} = 5$  м/с споживання електричної енергії з мережі не відбувається.

10. За результатами порівняльного аналізу визначено, що за рахунок використання електричного підсилювача РП на базі ДРК споживання електричної енергії зменшилося з 2,1563 МДж (0,598 кВт·год) до 0,8565 МДж (0,237 кВт·год) – на 60,4% за рахунок відсутності споживання енергії на прямих ділянках руху тролейбуса та у моменти простою на зупиночних пунктах або регульованих перехрестях. Річна економія електроенергії при цьому може сягати до 4680 МДж (1,3 МВт·год). Розроблені рекомендації щодо застосування електричного підсилювача РП на базі ДРК у конструкції сучасних тролейбусів, що використовуються на підприємствах МЕТ України.

11. Ряд результатів дисертаційної роботи впроваджені у Комунальному підприємстві «Тролейбусне депо № 2» (м. Харків), та у навчальний процес ХНУМГ імені О.М. Бекетова, що підтверджено актами, які наведені у Додатку Д.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Павленко Т. П., Скуріхін В. І., Колотило В. І., Агарков І.В. Аналіз проблем системи рульового керування тролейбусів та перспективи їх вирішення. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*,. 2018. Т. 1, № 32. С. 115–125.
2. Агарков І. В. Визначення механічних параметрів електричного підсилювача керма у системі рульового керування тролейбусу. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*,. 2020. № 35. С. 52–59.
3. Скуріхін В. І., Сорока К. О., Агарков І. В. Математичне моделювання електропідсилювача керма транспортного засобу з черв'ячною передачею. *Міжнародний журнал «Світлотехніка та Електроенергетика»*. 2020. № 59. С. 101–107.
4. Агарков І. В. Моделювання рульового керування тролейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі електродвигуна з ротором, що котиться. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*,. 2021. № 38. С. 88–106.
5. 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.
6. Агарков І. В. Перспективні рішення проблем системи рульового керування тролейбусів. *Сучасний рух науки : тези доп.ІV міжнар. науково-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 6–7 груд. 2018 р. С. 4–7.2*
7. Агарков І. В., Павленко Т. П., Скуріхін В. І. Електричний підсилювач для рульового керування тролейбусу. *«Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні»* : Наук. пр. Міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 15–18 жовт. 2019 р. С. 18–21.

8. Aharkov I. V. Transient processes in the trolleybus steering system. *Young Researchers in the Global World : Vistas and Challenges : Book of Papers of the International Forum for Young Researchers*, Kharkiv, 11 April 2019. P. 144–146.
9. Агарков І. В., Павленко Т. П. Моделювання електричного підсилювача рульового керування тролейбусу. *Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту*: Всеукр. науково-практ. конф., м. Харків, 14–16 квіт. 2021 р. С. 23–27.
10. Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту : пат. 124531 Україна : G01L 3/00. № u201711374 ; заявл. 20.11.2017 ; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7/2018.
11. Рульове керування тролейбуса з електромеханічним підсилювачем керма : пат. 139523 Україна : B62D 1/00. № u201906457 ; заявл. 10.06.2019 ; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1/2020.
12. Амоша О. І., Філіппова О. С. Європейський досвід забезпечення ефективного функціонування підприємств міського пасажирського транспорту. *Економіка будівництва і міського господарства*. 2010. № 4. С. 179–189.
13. Величко В. В. Сучасні підходи до формування моделі функціонування підприємств транспортної інфраструктури міста. *Економические проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального хозяйства на современном этапе* : матер. конф. ХНАМГ, м. Харків. 2010. С. 106–111.
14. Вірченко В. Стан та основні напрямки удосконалення роботи міського електричного транспорту в сучасних умовах. Устойчивое развитие городов. *Електрический транспорт – перспективы развития и кадровое обеспечение* : Всеукр. конференц.; матер. конф. ХНАМГ, м. Харків. 2009. С. 36–39.

15. Horiuchi S., Okada K., Nohtomi S. Effects of integrated control of active four wheel steering and individual wheel torque on vehicle handling and stability - a comparison of alternative control strategies. *Vehicle System Dynamics*. 2000. № 33. С. 680–691.

16. Димченко О. В., Телятник С. В. Дослідження якісного аспекту функціонування міського електричного транспорту. Транспортные системы мегаполисов и крупных городов. *Концепция перспективного развития транспортной системы: материалы международной научно-практической конференции*, ХНАМГ, м. Харків. 2010. С. 95–97.

17. ДСТУ UN/ECE R 79-01-2002. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів стосовно механізмів рульового управління(Правила ЕЭК ООН № 79-01:1991, IDT ). Вид. офіц.

18. Шевченко І. О., Кулаков Ю. М., Станіславенко А. В. Рульове керування сучасних вантажних автомобілів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. № 198. С. 393–401.

19. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина. навч. пос. / В. І. Скуріхін та ін. Харків : ХНАМГ ім. О. М. Бекет., 2018. 370 с.

20. Applications – Chassis & Suspension – Steering system. European Aluminium Association. URL: <https://www.european-aluminium.eu/media/1565/aam-applications-chassis-suspension-4-steering-system.pdf> (date of access: 10.07.2019).

21. Скуріхін І. Л., Коваленко А. В. Механічне обладнання рухомого складу міського електротранспорту: навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2012. 226 с.

22. Коваленко А. В., Скуріхін І. Л. Механічне обладнання транспортних засобів: Харків : ХНАМГ, 2011. 135 с.

23. Pneumatic collapsible steering column / Harsha Vardhan U et al. *International journal of mechanical and production engineering*. 2017. Vol. 5, no. 3. P. 160–163.
24. A review on design and manufacturing of steering system in an off road vehicle / N. M. Mali et al. *International journal of engineering science and computing*. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 12559–12560.
25. Stephen Johnson Jr. Pneumatic power control systems for trucks, trailers, buses. *SAE Transactions*. 1959. Vol. 67. P. 221–226.
26. A review paper on pneumatic operated collapsible steering system / Ravindra S. Warkar et al. *International research journal of engineering and technology*. 2017. Vol. 4, no. 2. P. 1440–1444.
27. Беліков К. О., Губарев О. П. Моделювання руху поршня пневматичного циліндра. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: матеріали науково-технічної конференції (26), Київ. 2021. Р. 341–344.
28. Беліков К.О., Губарев О.П. Адаптація керування в електропневматичних системах з дискретним програмним керуванням. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2020. no. 1. P. 18–22.
29. Губарев О. П., Ганпанцурова О. С. Адаптація логіки керування пневматичним виконавчим модулем мехатронної системи. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. no. 41 (1213). P. 32–38.
30. Ширгородський С. А. Підвищення ефективності використання сільськогосподарських машин шляхом модернізації системи гідрооб'ємного рульового керування: дис. канд. техн. наук : 05.05.11. Вінниця, 2006. 265 с.
31. Визначальний параметр стану гідрооб'ємного рульового керування трактора / С. А. Лебедев та ін. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 8(1117). С. 11–18.
32. Тролейбус Е183D1-01. Керівництво з експлуатації. Львів, 2006. 277 с.

33. Bus Active Safety – ZF. ZF Friedrichshafen AG. URL: [https://www.zf.com/products/en/buses/productfinder/active\\_safety.html](https://www.zf.com/products/en/buses/productfinder/active_safety.html) (date of access: 10.09.20).
34. Гідрооб'ємний рульовий механізм: пат. 65410 Україна : В62D 5/06. Опубл. 15.03.2004.
35. Зубенко Д. Ю. Вдосконалення технології випробування гідропідсилювача керма тролейбуса. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2014. № 2. С. 83–90.
36. Марцяш О. М. Определение характеристик рулевого управления с гидроусилителем. *Наукові нотатки*. 2013. № 41-2. С. 74–77.
37. ZF Servotronic2 for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles. *ZF Lenksysteme*, 2012. 16 p.
38. Двоканальне рульове керування транспортного засобу з підсилювачем: пат. 34001 Україна: В62D 1/18. Опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14/2008.
39. Рульове керування з електроприводом : пат. 36755 Україна : В62D 3/00. Опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21/2008.
40. Багатоканальне рульове керування транспортного засобу постійної чутливості з електромеханічним підсилювачем руля : пат. 83501 Україна : В62D 1/00. Опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17/2013.
41. Багатоканальне рульове керування з електромеханічним підсилювачем руля з тактильними властивостями : пат. 75946 Україна : В62D 1/00. Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24/2012.
42. Рульове керування транспортного засобу з корекцією напрямку руху : пат. 131958 Україна : В62D 1/18. Опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3/2019.
43. Слідкувальний електричний рульовий привід : пат. 73793 Україна F42В 15/01. Опубл. 15.09.2005, Бюл. № 9/2005.
44. Біліченко В. В., Добровольський О. Л. Перспективи використання активного рульового керування. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2013. Т. 1, № 41. С. 27–31.

45. ZF Servolectric. Electric Power Steering System for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles. *ZF Lenksysteme GmbH*. 18 p.
46. A Novel Steering System for a Space-Saving 4WS4WD Electric Vehicle: Design, Modeling, and Road Tests / Zutao Zhang et al. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, no. 1. P. 114–127. URL: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2561626>.
47. В. Х. Далека, О. С. Козлова, А. В. Шкрябко. Методи підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. URL: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i15.155686>.
48. Bartłomiejczyk, M. (2017). Autonomous Battery Drive in Trolleybuses: an Overview of Practical Examples. *Proceedings of 21st International Scientific Conference TRANSPORT MEANS 2017*, 19-24.
49. Mohamed, M., Garnett, R. Ferguson, M. & Kanaroglou, P. (2016). Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62 p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>.
50. Design and Sizing of Electric Bus Flash Charger Based on a Flywheel Energy Storage System: A Case Study / Shadnam Zarbil M. et al.; *Energies*, 2022. T. 15, №. 21. С. 8032.
51. Martiukhin, I., & Verbytskyi, I. (2020). Система електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, (4(6), 34–39. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.04.05>
52. Наній В. В Розвиток теорії та створення ефективних конструктивних виконань електродвигунів з ротором, що котиться : дис. д-ра техн. наук : 05.09.01. Харків, 2014. 335 с.
53. DST2-560 High-Torque Direct Drives Permanent-field synchronous motors. *Baumüller*. URL: <https://www.baumueller.com/en/download/dst2-560-en-gb> (date of access: 23.02.2018).



54. Torque motors kits. *Solid Metals. Fine Solutions. Willkommen bei ZOLLERN*. URL: <https://www.zollern.com/en/products/direct-drives/torque-motors-kits/> (date of access: 12.02.2018).
55. SIMOTICS T-1FW6 built-in torque motors for SINAMICS S120 – Industry Mall - Siemens WW. *Siemens WW*. URL: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/catalog/products/10030564> (date of access: 17.02.2023).
56. Rexroth indradyn T synchronous torque motors. *A Bosch Company*. URL: [https://store.boschrexroth.com/Automation-Solutions/Motors/Kit-Motors/Synchronous-Torque-Motors?cclcl=en\\_CA](https://store.boschrexroth.com/Automation-Solutions/Motors/Kit-Motors/Synchronous-Torque-Motors?cclcl=en_CA) (date of access: 02.02.2019).
57. Дунев О. О. Визначення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, на основі об'ємного чисельного моделювання електромагнітних процесів: дис. канд. техн. наук: 05.09.01, НТУ "ХПІ", Харків, 2015, 210 с
58. Єгоров А. В. Оцінка теплового стану електродвигуна з ротором, що котиться, при наявності внутрішніх механічних факторів: дис. канд. техн. наук: 05.09.01, НТУ "ХПІ", Харків, 2014, 200 с.
59. Масленніков А.М. Способи підвищення питомого обертового моменту двигуна з ротором, що котиться, з дискретним імпульсним: дис. канд. техн. наук: 05.09.01, НТУ "ХПІ", Харків, 2013, 189 с.
60. ПАТ. № 1.231.097 Франція Н 02 К 41/06. Steromotor / Rosain C., Stcherbatcheff G. (Франція). – 1959
61. Euyhab, E.-K. (2006) “Design and Analysis of Rolled Rotor Switched Reluctance Motor,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*. The Korean Institute of Electrical Engineers. doi: 10.5370/jeeet.2006.1.4.472.
62. Yamada H. Handbook of linear motor applications. Kogyo, Chosakai Publishing Co. Ltd., 1986., 582 p.
63. Пат. 2330 011 А Германия, МКИН 02 К 41/00, 7/075, 37/04. Rolling rotor motor / Michael John Flowerday (Англия). – № 9720845.8; Заявл. 02.10.97; Опубл. 07.04.99 – 19 p.

64. Пат. DE 102004009077, 7/116 Германия, МКИ Н 02 К 41/06. Elektrische Maschinen / Leibold Hubert (Германия); Applicant Sew Eurodrive GMB & Co (De). – № DE200410009077, 20040223; Оpubл. 22.09.2005 – 12 л.
65. Пат. WO 2007/086801 A1 Германия, МКИ Н 02 К 41/06. Elektromagnetisch roter maschine / Nordgren Robert (Швеция). – № PCT/SE2007/000073, Заявл. 26.01.2007; Оpubл. 02.08.2007 – 23 л.
66. Пат. 2009/0006011 A1 США, МКИ Н 02 К 37/24. Motor using magnetic normal force Application / Jonathan Sidney Edelson, Hans Juerge Walitzki (США). № 12/283,379; Заявл. 11.09.2007; Оpubл. 08.01.2009 – 25 р.
67. Victor W. K. Chan, Wai Kin. Foundations of Simulation Modeling. Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, ed. by James J. Cochran. 2011. P. 1–15. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470400531.eorms0336>
68. Thomas Witelski, Mark Bowen, Methods of Mathematical Modelling. Springer Nature Switzerland AG 2015, XVIII, 305 p.
69. Franke M. Multidisziplinäre Modellierung und Simulation eines Rolling Rotor Switched Reluktanz Antriebes: Doktoringenieur. Magdeburg, 2012. 152 p.
70. Modeling and simulation of different and representative engineering problems using Network Simulation Method / J. F. Sánchez-Pérez et al. PLoS ONE. 2018. No. 13(3). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193828>.
71. Задачин В. М., Конюшенко І. Г. Чисельні методи : навч. посіб. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
72. Любарский Б. Г., Рябов Е. С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде Matlab Simulink. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. С. 404–424.
73. Marino R., Peresada S., Valigi P. Adaptive input-output linearizing control of induction motors. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1993. Vol. 38, no. 2. P. 208–221. URL: <https://doi.org/10.1109/9.250510>.

74. Lutz Schrepfer. Modellierung und Simulation von Systemen dynamischer Struktur (Systems Engineering). 3rd ed. utzverlag GmbH, 2017. 174 p.
75. 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.
76. Клімов Е. С. Щодо визначення моменту опору повороту шини керованого колеса на місці. *Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ"*. 2014. № 46. С. 246–251.
77. 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.
78. Солтус А. П., Пилипенко В. І. Вплив плеча обкатки на граничний за зчепленням момент повороту шини. *Вісник КДПУ*. 2008. Т. 1, № 1(48). С. 71–74.
79. Солтус А. П., Клімов Е. С. Дослідження моменту опору повороту шини керованого колеса на місці залежно від довжини цапфи. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2012. Т. 1, № 4. С. 88–93.
80. Солтус А. П., Клімов Е. С., Пилипенко В. І. Дослідження впливу положення точки зустрічі осі шворня з опорною поверхнею на поворот керованого колеса на місці. *Машинознавство*. 2009. № 6. С. 41–44.
81. Солтус А. П., Черненко С. М. Визначення впливу поздовжнього нахилу шворня на ваговий стабілізуючий момент. *Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал "Машинознавство"*. 2003. № 6(72). С. 47–50.
82. 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.

83. Солтус А. П., Черненко С. М. Исследование устойчивости управляющего колесного модуля против колебаний, вызванных гидравлическим усилителем. *Вісник Кремен. держ. політ.університету: Наукові праці КДПУ*. 2001. № 1(10). С. 101–104.

84. Солтус А. П., Черненко С. М. Влияние упругости рулевого управления с гидроусилителем на колебания управляемых колёс автомобиля. *Вісник Кремен. держ. політ.університету: Наукові праці КДПУ*. 2002. № 6(17). С. 63–65.

85. Солтус А. П., Черненко С. М. О функциональной взаимосвязи углов поворота цапфы и управляемого колеса автомобиля. *Вісник Кремен. держ. політ.університету: Наукові праці КДПУ*. 2003. № 6(23). С. 107–112.

86. Клімов Е. С. Вдосконалення методу розрахунку моменту опору повороту шини залежно від конструктивних параметрів керованого моста: дис. канд. техн. наук : 05.22.02. Львів, 2013. 154 с.

87. Задорожня Ю. Анализ свойств шкворневых узлов грузовых автомобилей / А. П. Солтус та ін. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. 2004. № 6(29). С. 100–102.

88. Бертинов А. И., Варлей В. В. Электрические машины с катящимся ротором., *Энергия*, 1969. 201 с.

89. Наний В. В., Ликах В. А., Масленников А. М. Рух ротора в електродвигуні з ротором, що котиться. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2014. № 3(86). С. 9–13.

90. Наний В. В., Дунев А. А., Юхимчук В. Д. Экспериментальные исследования двигателя с катящимся ротором. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. 2009. № 41. С. 106–103.

91. Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Оверьянова Л. В., Емельянов В. Л. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода, *Електротехніка і Електромеханіка*. 2009. № 5. С. 67–72.

92. Рисованый С. В., Финкельштейн В. Б. Проектирование вентильных реактивных двигателей: монография, Харьков: ХНУГХ, 2014. 246 с.
93. Порцына З. П. Автоматизированный расчет вентильно-реактивных двигателей малой мощности: дис. канд. техн. наук, 05.09.01. Одесса, 2016, 245 с.
94. Reinert, J. Development and drive of a high torque, low speed rolling rotor switched reluctance motor., Degree: M. Eng., University of Pretoria (South Africa), 1994, 172 p.
95. J. Reinert, J. H. R. Enslin and E. D. Smith, "Digital control and optimization of a rolling rotor switched reluctance machine" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 2, pp. 338-344, March-April 1995, doi: 10.1109/28.370282.
96. GASPARIN E. Rolling Rotor Switched Reluctance Machines: Modelling and Design. <https://hdl.handle.net/>. URL:<https://hdl.handle.net/11583/2541895>
97. Выбор оптимального материала для сердечника двигателя с катящимся ротором, с применением численных методов / А. В. Егоров и др. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. № 60. С. 59–62.
98. Сравнение конструкций двигателей с катящимся ротором / В. В. Наний та ін. *II Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, м. Харків: НТУ «ХПИ», 25–27 берез. 2008 р, С. 57–58.
99. Miller T. J. E. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, no. 1. P. 83–90.
100. Наний В. В., Дунев А. А. Влияние неравномерности воздушного зазора ДКР на величину угла нагрузки. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2012. № 28. С. 65–69.

101. Влияние конструкции вентиляного ДКР на параметры его магнитного поля / В. В. Наний и др. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2007. № 25. С. 62–65.
102. Наний В. В., Масленников А. М. Зависимость максимального вращающего момента ДКР от количества статорных катушек при дискретном импульсном питании. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2012. № 28. С. 74–78.
103. 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.
104. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика расчета вентиляных индукторно-реактивных двигателей. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2009. № 4. С. 24–29.
105. Вербицкий Є. В. Теорія поля: навч.пос. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 262 с.
106. Толочко О. І. Розробка моделей складних. FEMM. URL: <https://www.femm.info/wiki/HomePage> (date of access: 04.08.2020).
107. Перов О. Г. Моделювання магнітних полів котушок та енергії між ними. *ΛΟΓΟΣ. ONLINE*. URL: <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.09.18.html> (date of access: 04.07.2020).
108. Любарский Б.Г. Моделирование и разработка комбинированного возбуждения сварочных генераторов постоянного тока с целью улучшения их технико-экономических показателей: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 Харьков. гос. политехн. ун-т. Харьков, 2000. 170с.
109. Маслій А. С. Структурний та параметричний синтез систем автоматичного керування лінійними електродвигунами моношпального стрілочного переводу: дис. канд. техн. наук : спец. 05.13.07, НТУ "ХПІ", Харків, 2018, 177 с.

110. Буряковський С. Г., Маслій А. С., Помазан Д. П. Використання програмного комплексу FEMM для створення імітаційної моделі вентильно-індукторного двигуна, *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 06-07 грудня 2018 р.* – Харків, 2018. С. 228-229.
111. Зюзин Д.Ю., Любарский Б.Г., Гаряжа В.Н. Математическая модель магнитного поля вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения. *Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник.*, Киев: Техника, 2004, Вып.60, С.200-205
112. Simulate Inductive Sensors Using FEMM (Finite Element Method Magnetics). Texas Instruments. URL: [https://www.ti.com/lit/an/snoaa04a/snoaa04a.pdf?ts=1633270241965&ref\\_url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2FLDC1101](https://www.ti.com/lit/an/snoaa04a/snoaa04a.pdf?ts=1633270241965&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2FLDC1101). (date of access: 04.11.2020).
113. Милых В. И. Численно-полевой анализ магнитного поля и электрических величин в статоре турбогенератора при автономной несимметричной нагрузке. *Електротехніка і електромеханіка.* 2016. № 5. С. 16–22.
114. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя. / В. В. Рымша та ін., *Електротехніка і Електромеханіка.* 2010. № 5. С. 24–26.
115. Balaji M., Kamaraj V. Design of high torque density and low torque ripple switched reluctance machine using genetic algorithm. *European journal of scientific research.* 2010. Vol. 47, no. 2. P. 187–196.
116. 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.

117. Моделирование взаимосвязанных электромагнитных и механических процессов в массиве ротора шнекового полифункционального электромеханического преобразователя / Н. Н. Заблудский та ін. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2013. № 40. С. 202–206. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu\\_2013\\_40\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2013_40_33).

118. David Meeker. Finite Element Method Magnetics: User's Manual Version 4.2. 2020. 161 с.

119. Карашецький В. П. Розрахунок тривимірних потенціальних магнітних полів методом кінцевих елементів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. № 23(12). С. 379–384.

120. Рябов Є. С. Безредукторний тяговий привод на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу: дис. канд. тех. наук, 05.22.09 НТУ «ХП», Харків, 2011. 162 с.

121. Любарский Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. дис. доктора техн. наук: 05.22.09 НТУ «ХП», Харків, 2014. 368с.

122. Задачин В. М., Конюшенко І. Г. Чисельні методи: навч. посіб. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

123. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2009. № 1. С. 13–16.

124. Любарский Б. Г., Парфенюк Т. В., Ерицянь 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.

125. A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors / Н. Р. Chi et al. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 1071–1080.



126. Trigonometry-based numerical method to compute nonlinear magnetic characteristics in switched reluctance motors / X. D. Xue et al. *12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Miami, 30 April – 3 May 2006. 2006. URL: <https://doi.org/10.1109/CEFC-06.2006.1633294>.
127. Xue X.-D., Cheng K. W. E., Ho S. L. Simulation of switched reluctance motor drives using two-dimensional bicubic spline. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2002. Vol. 17, no. 4. P. 471–477. URL: <https://doi.org/10.1109/TEC.2002.805226>.
128. Späth H. Two dimensional spline interpolation algorithms. Wellesley, Mass: A.K. Peters, 1995. 304 p.
129. Yogita Sukale, Varsha Gejji. New Numerical Methods for Solving Differential Equations. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*. 2017. No. 3(3). P. 22.
130. Власов К. П. Теория автоматического управления. Харьков: Гуманитарный центр, 2007. 526 p.
131. Дячук М. В., Петренко Д. И. Моделирование управляемости легкового автомобиля. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 12. С. 29–37.
132. Y. Xia, X. Yu, W. Oghanna. Adaptive Robust Fast Control for Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* August 2000. Vol. 47, P. 854-862.
133. Zeng Qun, Huang Juhua. The Development of Control Unit in Automotive Electric Power Steering System. *IEEE: Asia-Pacific Conference on Information Processing*, Shenzhen, 18–19 July 2009. 2009. P. 242–245. URL: <https://doi.org/10.1109/APCIP.2009.68>.
134. Electric power steering system based on fuzzy PID control / Zhanfeng Gao et al. *IEEE: International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Beijing, 6–19 August 2009. 2009. P. 456–459. URL: <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5274264>.
135. Proca A. B., Keyhani A. Identification of power steering system dynamic models. *Elsevier Science, Mechatronics*. 1998. No. 8. P. 255–270.

136. Xin Li, Xue-Ping Zhao, Jie Chen. Control Design for Electric Power Steering System Using T-S Fuzzy Model Approach. *International Journal of Automation and Computing*. May 2009. P. 198–203. URL: <https://doi.org/10.1007/s11633-009-0198-0>.

137. Model predictive steering control for independent driving and steering vehicles considering coaxial steering mechanism – Implementation to an embedded CPU / H. Nagimori et al. *10th Asian Control Conference (ASCC): IEEE*, Kota Kinabalu, 31 May – 3 June 2015. Kota Kinabalu, 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244549>.

138. Ганпанцурова О. С., Губарев О. П. Логіко-інерційна складова команд керування виконавчим модулем мехатронної системи. *АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика»* : тези доповідей XVII міжнародної науково-технічної конференції. 19 жовтня 2016 р. Харків, 2016. 72 с.

139. Солтус А. П. Основы теории рабочего процесса и расчета колесных управляющих модулей: монография. 7-ме вид. Деп. в Укр. НИИТИ №501-Ук90 ВИНТИ "Деп. науч. труды", 1990. 234 с.

140. Мурог И. А. Математическая модель рулевого управления с усилителем гидравлического типа. *Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение»*. 2009. № 14. С. 45–50.

141. Толочко О. І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання Simscape. *Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода*. 2015. № 12. С. 118–123.

142. Krížek M., Neittaanmäki P. Mathematical and Numerical Modelling in Electrical Engineering Theory and Applications. Netherlands: *Springer*, 1996. 300p.

143. Jörg Kahlert. Simulation technischer Systeme: Eine beispielorientierte Einführung. *Springer*, Wiesbaden: Vieweg, 2004. 308 p.

144. Marino R., Peresada S., Tomei P. Output feedback control of current-fed induction motors with unknown rotor resistance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 1996. Vol. 4, no. 4. P. 336–347. URL: <https://doi.org/10.1109/87.508882>.
145. Dingyü Xue, YangQuan Chen. System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 488 p.
146. Xue, Jun-jie & Wang, Ying & Li, Hao & Meng, Xiang-fei & Xiao, Ji-yang. Advanced Fireworks Algorithm and Its Application Research in PID Parameters Tuning. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/2534632>
147. Chin, Cheng Siong. Systematic modeling and model-based simulation of a remotely operated vehicle using matlab and simulink. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2012 URL: <https://doi.org/10.1142/S1793962311000566>.
148. M. Shouran and M. Habil, "Tuning of PID Controller Using Different Optimization Algorithms for Industrial DC Motor," *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, Greater Noida, India, 2021, pp. 756-759, doi: 10.1109/ICACITE51222.2021.9404616.
149. 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>.
150. Обеспечение динамических показателей электропривода на основе двигателя с катящимся ротором / Г. В. Кулинченко и др. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. № 42(1151). С. 34–38.
151. Кулинченко Г. В., Масленников А. М., Багута В. А. Исследование динамических параметров электропривода на базе двигателя с катящимся ротором. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 16. С. 9–14.
152. Порівняльний аналіз методів апроксимації / Н. В. Грищенко та ін. Кривий Ріг: КДПІ, 1998. 25 с.

153. 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>.
154. Дячук М. В. Вибір конструктивних параметрів рейкової трапеції автомобіля. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2008. № 12. С. 5.
155. M. Franke, O. Punk, H. Mrech and U. Schmucker, "Electrical actuation of a Rolling Rotor Switched Reluctance Motor," *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Trtatanska Lomnica, Slovakia, 2011, pp. 451-456, doi: 10.1109/ISSE.2011.6053905.
156. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е. С. Рябов и др. *Вестник НТУ "ХПИ"*. 2010. № 57. С. 244–251.
157. 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. URL: <https://doi.org/10.1109/MMAR.2014.6957420>.
158. Belousov B., Ksenevich T., Vantsevich V. Load estimation of an open-link locomotion module for robotic and commercial multi-wheel applications, *ElectricSAE International Journal of Commercial Vehiclesal Engineering & Electromechanics*. 2013. No. 5(2). P. 301–307. URL: <https://doi.org/10.4271/2013-01-2358>.
159. Marinescu G., Dumitru N., Geonea I. Dynamic Modelling and Simulation of an Auto Vehicle Steering Mechanism Considering its Elements as Flexible. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. No. 245. P. 150–155. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.245.150>.
160. Dynamics analysis and numerical simulation of large-scale hydraulic cylinder actuators / Van-Thuan Truong et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2020. No. 900. P. 14–19. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.900.14>.

## ДОДАТОК А

## МАКРОС РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОЛЮСУ ДРК

```
folderPath = "C:\\Experiment\\RRSRM\\"
fileName_FEMM = "RRSRM500.FEM"
fileName_outData = "outputData.xls"
currentStep = 0.1
currentInitValue = 0.01
topCurrent = 2.1
synchPolOnFrom = 0
synchPolOnTo = 24
angleStep = 7.5
--RRSRM param
polNumber = 48
Drext = 419.8
Dsint = 420
e = Dsint-Drext
Rsint = Dsint/2
stepsOfdesign = (topCurrent/currentStep)*(synchPolOnTo-synchPolOnFrom)
step = 0
magnetType= "Steel 2212"

-----

showconsole()
clearconsole()
print("Start")
open(folderPath..fileName_FEMM)
mi_zoomnatural()
mi_createmesh()
mi_savebitmap(folderPath..fileName_FEMM..".mesh_view.emf")
```

```

print("step: "..step.." of "..steps)
--Reset all windings current
for count=0, polNumber-1 do
mi_modifycircprop("W"..count.."+",1,0)
mi_modifycircprop("W"..count.."-",1,0)
end
--Set circuit data
handle=openfile(folderPath..fileName_outData,"a")
outData = {}
-- write Headertable
write(handle,"i","\t","angle","\t","Force_x","\t","Force_y","\t","Fw","\t","Lw","\n")
closefile(handle)
this_current = currentStep
for winding=synchPolOnFrom, synchPolOnTo do
for count=0, polNumber-1 do
mi_modifycircprop("W"..count.."+",1,0)
mi_modifycircprop("W"..count.."-",1,0)
end
for current=0, (topCurrent/currentStep) do
print("step: "..step.." of "..stepsOfdesign)
step = step + 1
--Set current of a certain windings
if current == 0 then
mi_modifycircprop("W"..winding.."+",1,currentInitValue)
mi_modifycircprop("W"..winding.."-",1,-currentInitValue)
mi_analyze()
mi_loadsolution()
mo_zoomnatural()
mo_savebitmap(folderPath..fileName_FEMM.."fluxDensity_("..step..").emf")

```

```

--build Flux density graph
mo_groupselectblock(1)
F_x = mo_blockintegral(18)
F_y = mo_blockintegral(19)
mo_addcontour(0,-Rsint)
mo_addcontour(0,Rsint)
mo_bendcontour(180)
mo_addcontour(0,Rsint)
mo_addcontour(0,-Rsint)
mo_bendcontour(180)
--mo_makeplot(1,2000)
mo_makeplot(1,2000,folderPath.."fluxDensity_step"..step.."").txt",0)
mo_makeplot(1,2000,folderPath.."fluxDensity_step"..step.."").emf")
--Set circuit data
handle=openfile(folderPath..fileName_outData,"a")
outData = {}
current1,x,Fwp = mo_getcircuitproperties("W"..winding.."")
current1n,x,Fwn = mo_getcircuitproperties("W"..winding.."")
Fw = Fwp - Fwn
Lw = Fw/currentInitValue
write(handle,currentInitValue,'\t',(winding*angleStep),'\t',F_x,'\t',F_y,'\t',Fw,'\t',Lw,'\n')
closefile(handle)
mo_close()
else
mi_modifycircprop("W"..winding.."",1,(current*currentStep))
mi_modifycircprop("W"..winding.."",1,-(current*currentStep))
mi_analyze()
mi_loadsolution()
mo_zoomnatural()

```

```

mo_savebitmap(folderPath..fileName_FEMM.."fluxDensity_("..step..").emf")
--build Flux density graph
mo_groupselectblock(1)
F_x = mo_blockintegral(18)
F_y = mo_blockintegral(19)
mo_addcontour(0,-Rsint)
mo_addcontour(0,Rsint)
mo_bendcontour(180)
mo_addcontour(0,Rsint)
mo_addcontour(0,-Rsint)
mo_bendcontour(180)
--mo_makeplot(1,2000)
mo_makeplot(1,2000,folderPath.."fluxDensity_step("..step..").txt",0)
mo_makeplot(1,2000,folderPath.."fluxDensity_step("..step..").emf")
--Set circuit data
handle=openfile(folderPath..fileName_outData,"a")
outData = {}
current1,x,Fwp = mo_getcircuitproperties("W"..winding.."+")
current1n,x,Fwn = mo_getcircuitproperties("W"..winding.."-")
Fw = Fwp - Fwn
Lw = Fw/(current*currentStep)
write(handle,(current*currentStep),'t',(winding*angleStep),'t',F_x,'t',F_y,'t',Fw,'t',Lw,'n')
closefile(handle)
mo_close()
end
end
end

```



**ДОДАТОК Б**  
**РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОТОКУ, МАГНІТНОЇ СИЛИ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ ПОЛЮСУ ДРК**

**Результати розрахунку магнітних та механічних параметрів ДРК**

$\varphi$  – кут між точкою з мінімальним магнітним зазором та полюсом,  $i$  – струм котушки,  $\Psi$  – потокозчеплення,  $\Phi$  – магнітний потік,  $L$  – індуктивність,  $F_y$  – тангенціальна сила,  $F_x$  – радіальна сила,  $F_{mag}$  – магнітна сила.

$\varphi$ , град	$i$ , А	$\Psi$ , Вб	$\Phi$ , Вб	$L$ , Гн	$F_y$ , Н	$F_x$ , Н	$F_{mag}$ , Н
0	0	0,0143	0,000048	2,5244	0,0003	-0,5612	0,5612
0	0.1	0,1409	0,000470	2,3177	0,1412	-27,4993	27,4996
0	0.2	0,2858	0,000953	2,0309	0,1202	-224,0028	224,0028
0	0.3	0,4283	0,001428	1,7217	-0,0081	-509,7747	509,7747
0	0.4	0,5480	0,001827	1,4474	-0,1889	-804,5179	804,5179
0	0.5	0,6300	0,002100	1,2502	-0,3714	-1042,4177	1042,4178
0	0.6	0,6819	0,002273	1,1091	-0,5213	-1215,5894	1215,5896
0	0.7	0,7159	0,002386	0,9935	-0,6176	-1333,5930	1333,5931
0	0.8	0,7399	0,002466	0,8972	-0,6762	-1417,8375	1417,8377
0	0.9	0,7592	0,002531	0,8188	-0,7186	-1488,7144	1488,7146
0	1	0,7756	0,002585	0,7544	-0,7490	-1550,6940	1550,6942
0	1.1	0,7896	0,002632	0,6994	-0,7682	-1604,5282	1604,5284
0	1.2	0,8018	0,002673	0,6520	-0,7788	-1652,0145	1652,0147
0	1.3	0,8126	0,002709	0,6109	-0,7833	-1694,9595	1694,9597
0	1.4	0,8224	0,002741	0,5750	-0,7826	-1734,1595	1734,1596
0	1.5	0,8313	0,002771	0,5432	-0,7775	-1770,1522	1770,1524
0	1.6	0,8394	0,002798	0,5149	-0,7686	-1803,4528	1803,4530
0	1.7	0,8469	0,002823	0,4895	-0,7566	-1834,5242	1834,5244
0	1.8	0,8538	0,002846	0,4665	-0,7420	-1863,6438	1863,6440
0	1.9	0,8603	0,002868	0,4457	-0,7249	-1891,0430	1891,0431
0	2	0,8664	0,002888	0,4267	-0,7058	-1916,9528	1916,9529
0	2.1	0,8722	0,002907	0,4091	-0,6851	-1941,6045	1941,6046
7.5	0	0,0252	0,000084	2,0461	0,4035	-3,1335	3,1594
7.5	0.1	0,2504	0,000835	2,0042	41,8164	-306,2041	309,0462
7.5	0.2	0,4062	0,001354	1,8508	76,3328	-568,1764	573,2810
7.5	0.3	0,5100	0,001700	1,6395	104,3265	-787,2585	794,1410

7.5	0.4	0,5790	0,001930	1,4236	126,1712	-961,6585	969,9001
7.5	0.5	0,6285	0,002095	1,2459	142,5065	-1092,5818	1101,8362
7.5	0.6	0,6654	0,002218	1,1050	155,0356	-1193,2235	1203,2533
7.5	0.7	0,6943	0,002314	0,9901	165,4597	-1277,4872	1288,1577
7.5	0.8	0,7177	0,002392	0,8958	174,4094	-1350,1202	1361,3387
7.5	0.9	0,7374	0,002458	0,8181	182,2295	-1413,5295	1425,2274
7.5	1	0,7544	0,002515	0,7534	189,1940	-1469,9154	1482,0411
7.5	1.1	0,7692	0,002564	0,6984	195,5309	-1521,1805	1533,6957
7.5	1.2	0,7824	0,002608	0,6512	201,3542	-1568,2430	1581,1166
7.5	1.3	0,7943	0,002648	0,6102	206,7430	-1611,7302	1624,9359
7.5	1.4	0,8050	0,002683	0,5742	211,7499	-1652,0902	1665,6050
7.5	1.5	0,8149	0,002716	0,5425	216,4186	-1689,7031	1703,5062
7.5	1.6	0,8238	0,002746	0,5142	220,7858	-1724,8557	1738,9288
7.5	1.7	0,8321	0,002774	0,4888	224,8843	-1757,8001	1772,1270
7.5	1.8	0,8397	0,002799	0,4658	228,7401	-1788,7426	1803,3087
7.5	1.9	0,8468	0,002823	0,4451	232,3774	-1817,8781	1832,6702
7.5	2	0,8534	0,002845	0,4261	235,8205	-1845,4014	1860,4080
7.5	2.1	0,8596	0,002865	0,4085	239,0936	-1871,5075	1886,7183
15	0	0,0139	0,000046	1,6153	0,1328	-0,5104	0,5274
15	0.1	0,1368	0,000456	1,6392	6,2185	-23,2812	24,0974
15	0.2	0,2786	0,000929	1,5929	53,0183	-203,7902	210,5740
15	0.3	0,4194	0,001398	1,4955	121,9665	-470,1020	485,6663
15	0.4	0,5393	0,001798	1,3657	194,4976	-750,2809	775,0811
15	0.5	0,6237	0,002079	1,2229	255,0672	-984,0898	1016,6081
15	0.6	0,6783	0,002261	1,0880	300,2152	-1158,0858	1196,3661
15	0.7	0,7136	0,002379	0,9772	330,7083	-1275,2303	1317,4142
15	0.8	0,7378	0,002459	0,8875	352,1355	-1357,3082	1402,2428
15	0.9	0,7575	0,002525	0,8121	370,1631	-1426,3987	1473,6464
15	1	0,7742	0,002581	0,7482	385,9438	-1486,9347	1536,2055
15	1.1	0,7884	0,002628	0,6939	399,5932	-1539,3030	1590,3234
15	1.2	0,8006	0,002669	0,6473	411,5934	-1585,3522	1637,9104
15	1.3	0,8116	0,002705	0,6068	422,4438	-1627,0094	1680,9575
15	1.4	0,8214	0,002738	0,5712	432,3486	-1665,0545	1720,2708
15	1.5	0,8304	0,002768	0,5397	441,4373	-1699,9800	1756,3595
15	1.6	0,8386	0,002795	0,5117	449,8379	-1732,2747	1789,7290
15	1.7	0,8461	0,002820	0,4865	457,6667	-1762,3848	1820,8402
15	1.8	0,8531	0,002844	0,4638	464,9964	-1790,5875	1849,9798

15	1.9	0,8597	0,002866	0,4432	471,8885	-1817,1181	1877,3910
15	2	0,8658	0,002886	0,4243	478,4048	-1842,2118	1903,3169
15	2.1	0,8716	0,002905	0,4069	484,6068	-1866,1037	1928,0008
22.5	0	0,0205	0,000068	1,4302	0,6668	-1,4849	1,6277
22.5	0.1	0,2164	0,000721	1,4234	84,3517	-188,4675	206,4830
22.5	0.2	0,3702	0,001234	1,4288	174,4588	-405,6673	441,5901
22.5	0.3	0,4864	0,001621	1,4198	261,3496	-623,6617	676,2082
22.5	0.4	0,5695	0,001898	1,3701	335,3853	-813,0280	879,4873
22.5	0.5	0,6251	0,002084	1,2648	389,9377	-952,8706	1029,5697
22.5	0.6	0,6630	0,002210	1,1365	430,4200	-1056,4015	1140,7215
22.5	0.7	0,6926	0,002309	1,0215	463,9911	-1142,0920	1232,7457
22.5	0.8	0,7167	0,002389	0,9248	492,7494	-1215,3440	1311,4355
22.5	0.9	0,7366	0,002455	0,8438	517,5567	-1278,3724	1379,1667
22.5	1	0,7534	0,002511	0,7756	539,3879	-1333,7146	1438,6570
22.5	1.1	0,7682	0,002561	0,7178	559,1263	-1383,6743	1492,3729
22.5	1.2	0,7814	0,002605	0,6682	577,1748	-1429,2959	1541,4336
22.5	1.3	0,7932	0,002644	0,6251	593,7977	-1471,2614	1586,5704
22.5	1.4	0,8039	0,002680	0,5874	609,1839	-1510,0608	1628,3085
22.5	1.5	0,8137	0,002712	0,5542	623,4940	-1546,1099	1667,0935
22.5	1.6	0,8227	0,002742	0,5246	636,8480	-1579,7206	1703,2593
22.5	1.7	0,8309	0,002770	0,4981	649,3504	-1611,1634	1737,0962
22.5	1.8	0,8385	0,002795	0,4744	661,0831	-1640,6494	1768,8305
22.5	1.9	0,8456	0,002819	0,4528	672,1227	-1668,3747	1798,6726
22.5	2	0,8522	0,002841	0,4332	682,5453	-1694,5354	1826,8329
22.5	2.1	0,8584	0,002861	0,4151	692,4273	-1719,3276	1853,5218
30	0	0,0128	0,000043	1,3942	0,2020	-0,3608	0,4135
30	0.1	0,1256	0,000419	1,3853	10,6207	-18,9670	21,7382
30	0.2	0,2552	0,000851	1,3930	80,7216	-144,1620	165,2231
30	0.3	0,3866	0,001289	1,3899	189,2840	-337,9976	387,3898
30	0.4	0,5050	0,001683	1,3483	315,0870	-562,5255	644,7595
30	0.5	0,5979	0,001993	1,2519	437,4682	-780,8126	895,0121
30	0.6	0,6635	0,002212	1,1305	537,9981	-959,9858	1100,4611
30	0.7	0,7044	0,002348	1,0184	604,7363	-1078,7754	1236,7143
30	0.8	0,7304	0,002435	0,9223	649,4653	-1158,2631	1327,9226
30	0.9	0,7515	0,002505	0,8418	686,8831	-1224,7288	1404,1969
30	1	0,7696	0,002565	0,7742	719,6269	-1282,8925	1470,9439
30	1.1	0,7847	0,002616	0,7166	747,6187	-1332,6175	1528,0062

30	1.2	0,7975	0,002658	0,6672	771,9809	-1375,9004	1577,6744
30	1.3	0,8090	0,002697	0,6243	793,9370	-1414,9174	1622,4449
30	1.4	0,8193	0,002731	0,5867	813,9149	-1450,4292	1663,1904
30	1.5	0,8286	0,002762	0,5536	832,1563	-1482,8650	1700,4037
30	1.6	0,8370	0,002790	0,5241	848,9550	-1512,7458	1734,6828
30	1.7	0,8448	0,002816	0,4977	864,5865	-1540,5592	1766,5878
30	1.8	0,8521	0,002840	0,4740	879,2011	-1566,5698	1796,4230
30	1.9	0,8588	0,002863	0,4525	892,9178	-1590,9868	1824,4290
30	2	0,8651	0,002884	0,4329	905,8558	-1614,0189	1850,8462
30	2.1	0,8711	0,002904	0,4148	918,1340	-1635,8751	1875,9151
37.5	0	0,0162	0,000054	1,3311	0,4784	-0,5788	0,7509
37.5	0.1	0,1717	0,000572	1,3245	59,7623	-65,1380	88,3996
37.5	0.2	0,3186	0,001062	1,3298	179,6757	-219,9097	283,9783
37.5	0.3	0,4468	0,001489	1,3215	325,3640	-415,1043	527,4214
37.5	0.4	0,5463	0,001821	1,2739	461,9723	-600,9322	757,9828
37.5	0.5	0,6111	0,002037	1,1735	563,1577	-739,4431	929,4744
37.5	0.6	0,6528	0,002176	1,0542	636,6245	-840,0446	1054,0236
37.5	0.7	0,6845	0,002282	0,9529	696,2341	-921,0109	1154,5575
37.5	0.8	0,7100	0,002367	0,8701	746,4293	-988,7244	1238,8432
37.5	0.9	0,7308	0,002436	0,7990	789,2522	-1046,4236	1310,6950
37.5	1	0,7482	0,002494	0,7376	826,5612	-1096,6641	1373,2719
37.5	1.1	0,7634	0,002545	0,6852	859,9673	-1141,5756	1429,2440
37.5	1.2	0,7768	0,002589	0,6402	890,2751	-1182,2680	1479,9823
37.5	1.3	0,7888	0,002629	0,6008	918,0386	-1219,5225	1526,4436
37.5	1.4	0,7997	0,002666	0,5661	943,6139	-1253,8234	1569,2292
37.5	1.5	0,8096	0,002699	0,5353	967,2913	-1285,5603	1608,8249
37.5	1.6	0,8187	0,002729	0,5079	989,2966	-1315,0408	1645,6124
37.5	1.7	0,8271	0,002757	0,4832	1009,8275	-1342,5356	1679,9266
37.5	1.8	0,8348	0,002783	0,4608	1029,0348	-1368,2489	1712,0215
37.5	1.9	0,8420	0,002807	0,4406	1047,0574	-1392,3684	1742,1306
37.5	2	0,8487	0,002829	0,4221	1064,0342	-1415,0818	1770,4873
37.5	2.1	0,8549	0,002850	0,4049	1080,1041	-1436,5769	1797,3252
45	0	0,0115	0,000038	1,2768	0,2259	-0,2328	0,3244
45	0.1	0,1159	0,000386	1,2660	18,2700	-18,7576	26,1847
45	0.2	0,2302	0,000767	1,2761	90,3029	-93,0664	129,6764
45	0.3	0,3470	0,001157	1,2830	207,0298	-213,4208	297,3378
45	0.4	0,4591	0,001530	1,2624	359,1557	-370,0828	515,7073

45	0.5	0,5585	0,001862	1,1983	531,7255	-547,5208	763,2241
45	0.6	0,6355	0,002118	1,1058	687,1447	-707,0299	985,9306
45	0.7	0,6838	0,002279	1,0063	793,5959	-815,9181	1138,2077
45	0.8	0,7136	0,002379	0,9130	865,0102	-888,7191	1240,1872
45	0.9	0,7371	0,002457	0,8348	922,6860	-947,5308	1322,5597
45	1	0,7567	0,002522	0,7696	971,6433	-997,4819	1392,5016
45	1.1	0,7729	0,002576	0,7134	1013,0351	-1039,6854	1451,6149
45	1.2	0,7865	0,002622	0,6646	1048,8258	-1076,1614	1502,7172
45	1.3	0,7986	0,002662	0,6223	1080,8886	-1108,8492	1548,5047
45	1.4	0,8094	0,002698	0,5852	1109,9189	-1138,4586	1589,9711
45	1.5	0,8191	0,002730	0,5524	1136,3276	-1165,4028	1627,6991
45	1.6	0,8279	0,002760	0,5231	1160,5643	-1190,1394	1662,3301
45	1.7	0,8360	0,002787	0,4969	1183,0428	-1213,0898	1694,4548
45	1.8	0,8435	0,002812	0,4734	1203,9951	-1234,4886	1724,4032
45	1.9	0,8504	0,002835	0,4520	1223,6078	-1254,5239	1752,4401
45	2	0,8569	0,002856	0,4326	1242,0673	-1273,3835	1778,8302
45	2.1	0,8631	0,002877	0,4146	1259,5603	-1291,2553	1803,8382
52.5	0	0,0133	0,000044	1,1630	0,3355	-0,2676	0,4291
52.5	0.1	0,1308	0,000436	1,1536	14,4624	-11,4531	18,4482
52.5	0.2	0,2660	0,000887	1,1624	133,9241	-106,8136	171,3033
52.5	0.3	0,3989	0,001330	1,1677	309,1711	-246,4427	395,3742
52.5	0.4	0,5096	0,001699	1,1475	490,6542	-390,4338	627,0408
52.5	0.5	0,5842	0,001947	1,0879	638,5361	-506,8201	815,2269
52.5	0.6	0,6325	0,002108	1,0059	751,8274	-595,3931	959,0294
52.5	0.7	0,6682	0,002227	0,9230	839,1903	-663,6714	1069,9065
52.5	0.8	0,6961	0,002320	0,8469	909,0464	-718,3214	1158,5987
52.5	0.9	0,7187	0,002396	0,7809	968,6239	-764,9290	1234,2401
52.5	1	0,7376	0,002459	0,7240	1020,6185	-805,6079	1300,2562
52.5	1.1	0,7539	0,002513	0,6745	1066,5469	-841,5626	1358,5838
52.5	1.2	0,7682	0,002561	0,6313	1107,7436	-873,8339	1410,9151
52.5	1.3	0,7810	0,002603	0,5933	1145,3536	-903,3099	1458,6993
52.5	1.4	0,7925	0,002642	0,5598	1179,9469	-930,4347	1502,6587
52.5	1.5	0,8030	0,002677	0,5300	1211,9276	-955,5233	1543,3059
52.5	1.6	0,8126	0,002709	0,5032	1241,6114	-978,8215	1581,0409
52.5	1.7	0,8214	0,002738	0,4792	1269,2750	-1000,5442	1616,2140
52.5	1.8	0,8295	0,002765	0,4574	1295,1261	-1020,8527	1649,0882
52.5	1.9	0,8371	0,002790	0,4375	1319,3554	-1039,8949	1679,9048

52.5	2	0,8441	0,002814	0,4194	1342,1534	-1057,8184	1708,9048
52.5	2.1	0,8507	0,002836	0,4025	1363,7108	-1074,7713	1736,3296
60	0	0,0103	0,000034	1,1513	0,2210	-0,1318	0,2574
60	0.1	0,1062	0,000354	1,1454	22,9064	-13,6467	26,6634
60	0.2	0,2064	0,000688	1,1509	88,3787	-52,7019	102,8994
60	0.3	0,3091	0,001030	1,1557	197,8039	-117,9612	230,3068
60	0.4	0,4121	0,001374	1,1476	352,3476	-210,0881	410,2265
60	0.5	0,5116	0,001705	1,1165	544,8486	-324,7747	634,3017
60	0.6	0,5956	0,001985	1,0592	734,8381	-437,8261	855,3822
60	0.7	0,6542	0,002181	0,9782	883,7083	-526,1840	1028,4988
60	0.8	0,6933	0,002311	0,8920	993,6044	-591,2225	1156,1980
60	0.9	0,7217	0,002406	0,8184	1076,2907	-640,0632	1252,2310
60	1	0,7435	0,002478	0,7567	1141,2543	-678,3823	1327,6535
60	1.1	0,7614	0,002538	0,7028	1196,2042	-710,7739	1391,4396
60	1.2	0,7766	0,002589	0,6554	1244,0151	-738,9474	1446,9336
60	1.3	0,7898	0,002633	0,6142	1286,2462	-763,8272	1495,9483
60	1.4	0,8014	0,002671	0,5781	1324,0298	-786,0832	1539,7992
60	1.5	0,8119	0,002706	0,5461	1358,3072	-806,2714	1579,5796
60	1.6	0,8213	0,002738	0,5174	1389,6816	-824,7495	1615,9909
60	1.7	0,8299	0,002766	0,4917	1418,6351	-841,8034	1649,5934
60	1.8	0,8378	0,002793	0,4686	1445,5033	-857,6312	1680,7769
60	1.9	0,8452	0,002817	0,4476	1470,5850	-872,4087	1709,8881
60	2	0,8520	0,002840	0,4285	1494,1792	-886,3121	1737,2739
60	2.1	0,8585	0,002862	0,4107	1516,5848	-899,5173	1763,2813
67.5	0	0,0116	0,000039	1,0323	0,2998	-0,1314	0,3273
67.5	0.1	0,1144	0,000381	1,0312	15,3560	-6,5045	16,6768
67.5	0.2	0,2325	0,000775	1,0321	119,7795	-52,4945	130,7777
67.5	0.3	0,3520	0,001173	1,0326	280,9680	-123,2680	306,8192
67.5	0.4	0,4590	0,001530	1,0304	466,3194	-203,9917	508,9856
67.5	0.5	0,5425	0,001808	1,0212	645,6828	-281,1254	704,2285
67.5	0.6	0,6036	0,002012	0,9927	798,7134	-346,3004	870,5556
67.5	0.7	0,6464	0,002155	0,9361	913,3356	-394,8523	995,0328
67.5	0.8	0,6775	0,002258	0,8666	1000,7453	-431,7616	1089,9125
67.5	0.9	0,7028	0,002343	0,8014	1075,2588	-463,2413	1170,8006
67.5	1	0,7240	0,002413	0,7435	1140,4043	-490,7897	1241,5299
67.5	1.1	0,7420	0,002473	0,6922	1197,2273	-514,8240	1303,2256
67.5	1.2	0,7575	0,002525	0,6471	1247,6321	-536,1507	1357,9556

67.5	1.3	0,7713	0,002571	0,6075	1293,4777	-555,5617	1407,7405
67.5	1.4	0,7837	0,002612	0,5724	1335,5823	-573,4002	1453,4676
67.5	1.5	0,7949	0,002650	0,5412	1374,4715	-589,8846	1495,7057
67.5	1.6	0,8052	0,002684	0,5133	1410,5396	-605,1808	1534,8830
67.5	1.7	0,8146	0,002715	0,4882	1444,1281	-619,4329	1571,3698
67.5	1.8	0,8233	0,002744	0,4655	1475,4969	-632,7504	1605,4483
67.5	1.9	0,8313	0,002771	0,4449	1504,8855	-645,2342	1637,3783
67.5	2	0,8387	0,002796	0,4260	1532,5337	-656,9850	1667,4198
67.5	2.1	0,8457	0,002819	0,4086	1558,6811	-668,1036	1695,8329
75	0	0,0092	0,000031	1,0161	0,1952	-0,0549	0,2027
75	0.1	0,0956	0,000319	1,0116	21,5312	-6,0562	22,3667
75	0.2	0,1844	0,000615	1,0158	78,0410	-21,9412	81,0667
75	0.3	0,2755	0,000918	1,0192	173,4356	-48,7554	180,1583
75	0.4	0,3684	0,001228	1,0123	311,4262	-87,5447	323,4971
75	0.5	0,4614	0,001538	0,9872	489,9943	-137,7312	508,9836
75	0.6	0,5462	0,001821	0,9429	684,2037	-192,2421	710,6981
75	0.7	0,6149	0,002050	0,8823	865,9252	-243,1164	899,4065
75	0.8	0,6662	0,002221	0,8170	1017,1758	-285,3334	1056,4383
75	0.9	0,7018	0,002339	0,7581	1128,0038	-316,1502	1171,4706
75	1	0,7270	0,002423	0,7065	1210,4359	-338,9934	1257,0090
75	1.1	0,7475	0,002492	0,6605	1279,3322	-358,0743	1328,4984
75	1.2	0,7648	0,002549	0,6196	1338,9059	-374,5722	1390,3141
75	1.3	0,7795	0,002598	0,5835	1390,7444	-388,9205	1444,1015
75	1.4	0,7923	0,002641	0,5514	1436,5770	-401,6008	1491,6557
75	1.5	0,8037	0,002679	0,5227	1477,9689	-413,0513	1534,6020
75	1.6	0,8140	0,002713	0,4968	1515,6873	-423,4862	1573,7371
75	1.7	0,8233	0,002744	0,4735	1550,2783	-433,0578	1609,6279
75	1.8	0,8318	0,002773	0,4524	1582,2011	-441,8929	1642,7507
75	1.9	0,8396	0,002799	0,4331	1611,8931	-450,1118	1673,5590
75	2	0,8469	0,002823	0,4154	1639,7915	-457,8349	1702,5066
75	2.1	0,8538	0,002846	0,3989	1666,3337	-465,1827	1730,0471
82.5	0	0,0102	0,000034	0,9224	0,2454	-0,0364	0,2481
82.5	0.1	0,1025	0,000342	0,9231	19,6890	-2,7965	19,8866
82.5	0.2	0,2032	0,000677	0,9222	98,1102	-14,5372	99,1813
82.5	0.3	0,3060	0,001020	0,9211	224,9354	-33,4353	227,4068
82.5	0.4	0,4049	0,001350	0,9211	389,5910	-57,6677	393,8359
82.5	0.5	0,4937	0,001646	0,9211	576,9469	-84,8097	583,1470

82.5	0.6	0,5658	0,001886	0,9103	753,6463	-110,0300	761,6360
82.5	0.7	0,6171	0,002057	0,8791	890,8628	-129,2446	900,1892
82.5	0.8	0,6536	0,002179	0,8328	996,1156	-143,7645	1006,4366
82.5	0.9	0,6826	0,002275	0,7798	1083,7003	-155,8600	1094,8510
82.5	1	0,7065	0,002355	0,7270	1158,6700	-166,2433	1170,5353
82.5	1.1	0,7265	0,002422	0,6794	1223,6743	-175,2365	1236,1580
82.5	1.2	0,7435	0,002478	0,6373	1280,9919	-183,1624	1294,0204
82.5	1.3	0,7585	0,002528	0,5997	1332,6025	-190,3104	1346,1231
82.5	1.4	0,7719	0,002573	0,5660	1379,6608	-196,8383	1393,6317
82.5	1.5	0,7840	0,002613	0,5358	1423,0314	-202,8604	1437,4180
82.5	1.6	0,7950	0,002650	0,5088	1463,2416	-208,4492	1478,0146
82.5	1.7	0,8050	0,002683	0,4843	1500,7013	-213,6620	1515,8350
82.5	1.8	0,8143	0,002714	0,4621	1535,6845	-218,5362	1551,1560
82.5	1.9	0,8228	0,002743	0,4419	1568,4318	-223,1047	1584,2203
82.5	2	0,8307	0,002769	0,4235	1599,1835	-227,4003	1615,2705
82.5	2.1	0,8381	0,002794	0,4064	1628,1801	-231,4558	1644,5492
90	0	0,0082	0,000027	0,8912	0,1557	-0,0014	0,1557
90	0.1	0,0847	0,000282	0,8911	16,2099	-0,1447	16,2105
90	0.2	0,1640	0,000547	0,8910	62,2529	-0,5747	62,2556
90	0.3	0,2453	0,000818	0,8907	139,3696	-1,2900	139,3755
90	0.4	0,3278	0,001093	0,8900	248,6447	-2,2891	248,6552
90	0.5	0,4104	0,001368	0,8868	389,6925	-3,5654	389,7088
90	0.6	0,4903	0,001634	0,8708	556,2449	-5,0917	556,2682
90	0.7	0,5640	0,001880	0,8340	736,8094	-6,7507	736,8403
90	0.8	0,6254	0,002085	0,7851	904,8787	-8,0842	904,9148
90	0.9	0,6698	0,002233	0,7355	1037,3431	-8,8540	1037,3809
90	1	0,7016	0,002339	0,6887	1139,6979	-10,0407	1139,7421
90	1.1	0,7266	0,002422	0,6462	1222,9540	-12,0121	1223,0130
90	1.2	0,7467	0,002489	0,6080	1291,5806	-11,4646	1291,6315
90	1.3	0,7633	0,002544	0,5738	1349,2955	-7,5156	1349,3165
90	1.4	0,7782	0,002594	0,5431	1403,3537	-12,6382	1403,4106
90	1.5	0,7925	0,002642	0,5155	1456,7943	-30,1824	1457,1069
90	1.6	0,8024	0,002675	0,4906	1487,9294	-13,6477	1487,9920
90	1.7	0,8052	0,002684	0,4680	1492,2565	-8,8540	1492,2828
90	1.8	0,8054	0,002685	0,4474	1495,8454	-10,0407	1495,8791
90	1.9	0,8091	0,002697	0,4286	1497,4426	-12,0121	1497,4908
90	2	0,8227	0,002742	0,4114	1553,3191	-11,4646	1553,3614



90	2.1	0,8325	0,002775	0,3953	1584,4932	-7,5156	1584,5110
97.5	0	0,0089	0,000030	0,8203	0,1841	0,0225	0,1855
97.5	0.1	0,0920	0,000307	0,8208	19,8066	2,4310	19,9552
97.5	0.2	0,1782	0,000594	0,8202	73,6133	8,9892	74,1602
97.5	0.3	0,2665	0,000888	0,8195	164,1016	20,0288	165,3193
97.5	0.4	0,3560	0,001187	0,8196	293,7686	35,8815	295,9518
97.5	0.5	0,4442	0,001481	0,8203	459,0380	56,1524	462,4597
97.5	0.6	0,5225	0,001742	0,8172	632,0387	77,5391	636,7772
97.5	0.7	0,5830	0,001943	0,8055	784,3816	96,6324	790,3116
97.5	0.8	0,6281	0,002094	0,7817	909,9007	112,5028	916,8294
97.5	0.9	0,6621	0,002207	0,7447	1009,5565	125,0837	1017,2759
97.5	1	0,6887	0,002296	0,7016	1090,5932	135,2820	1098,9516
97.5	1.1	0,7108	0,002369	0,6603	1160,5981	144,0855	1169,5078
97.5	1.2	0,7297	0,002432	0,6223	1222,2485	151,8328	1231,6430
97.5	1.3	0,7460	0,002487	0,5875	1276,9946	158,7021	1286,8184
97.5	1.4	0,7603	0,002534	0,5559	1326,2893	164,8791	1336,4985
97.5	1.5	0,7732	0,002577	0,5273	1371,4336	170,5317	1381,9954
97.5	1.6	0,7849	0,002616	0,5015	1413,1194	175,7479	1424,0062
97.5	1.7	0,7956	0,002652	0,4783	1451,8430	180,5904	1463,0314
97.5	1.8	0,8054	0,002685	0,4574	1487,9294	185,1007	1499,3986
97.5	1.9	0,8144	0,002715	0,4385	1521,6607	189,3148	1533,3921
97.5	2	0,8227	0,002742	0,4214	1553,3191	193,2688	1565,2965
97.5	2.1	0,8305	0,002768	0,4056	1583,1867	196,9988	1595,3961
105	0	0,0074	0,000025	0,7998	0,1226	0,0318	0,1267
105	0.1	0,0767	0,000256	0,8003	12,2356	3,1680	12,6391
105	0.2	0,1489	0,000496	0,7997	49,0458	12,6994	50,6632
105	0.3	0,2230	0,000743	0,7990	110,3657	28,5780	114,0056
105	0.4	0,2977	0,000992	0,7991	196,0082	50,7556	202,4730
105	0.5	0,3721	0,001240	0,7995	305,8417	79,2000	315,9300
105	0.6	0,4460	0,001487	0,7941	439,9585	113,9413	454,4734
105	0.7	0,5181	0,001727	0,7768	594,6964	154,0475	614,3244
105	0.8	0,5827	0,001942	0,7481	751,1523	194,6738	775,9688
105	0.9	0,6344	0,002115	0,7107	890,0168	230,8576	919,4701
105	1	0,6741	0,002247	0,6703	1005,5971	261,0755	1038,9350
105	1.1	0,7040	0,002347	0,6320	1097,3069	285,1151	1133,7430
105	1.2	0,7273	0,002424	0,5968	1171,3710	304,5688	1210,3190
105	1.3	0,7465	0,002488	0,5646	1234,6771	321,2143	1275,7767

105	1.4	0,7629	0,002543	0,5353	1289,9543	335,7674	1332,9372
105	1.5	0,7772	0,002591	0,5088	1338,8147	348,6557	1383,4687
105	1.6	0,7897	0,002632	0,4847	1382,5618	360,2178	1428,7176
105	1.7	0,8009	0,002670	0,4628	1422,3020	370,7388	1469,8266
105	1.8	0,8110	0,002703	0,4428	1458,6625	380,3810	1507,4435
105	1.9	0,8202	0,002734	0,4245	1492,1504	389,2757	1542,0922
105	2	0,8287	0,002762	0,4076	1523,2731	397,5543	1574,2967
105	2.1	0,8366	0,002789	0,3919	1552,5377	405,3482	1604,5811
112.5	0	0,0080	0,000027	0,7446	0,1361	0,0549	0,1468
112.5	0.1	0,0827	0,000276	0,7447	14,5664	5,8656	15,7030
112.5	0.2	0,1599	0,000533	0,7445	54,4235	21,9692	58,6904
112.5	0.3	0,2391	0,000797	0,7443	121,4379	49,0366	130,9647
112.5	0.4	0,3196	0,001065	0,7442	217,3404	87,7387	234,3820
112.5	0.5	0,4002	0,001334	0,7442	341,3641	137,7875	368,1234
112.5	0.6	0,4765	0,001588	0,7433	482,7540	195,0604	520,6726
112.5	0.7	0,5436	0,001812	0,7397	627,6446	254,1407	677,1449
112.5	0.8	0,5984	0,001995	0,7284	759,7191	308,2710	819,8806
112.5	0.9	0,6395	0,002132	0,7052	866,3096	352,1126	935,1340
112.5	1	0,6703	0,002234	0,6741	951,7962	387,3423	1027,5943
112.5	1.1	0,6953	0,002318	0,6400	1023,8093	417,0005	1105,4749
112.5	1.2	0,7162	0,002387	0,6061	1085,9336	442,5651	1172,6532
112.5	1.3	0,7340	0,002447	0,5742	1140,5508	465,0382	1231,7129
112.5	1.4	0,7494	0,002498	0,5450	1189,2764	485,0812	1284,3995
112.5	1.5	0,7632	0,002544	0,5181	1233,4249	503,2270	1332,1316
112.5	1.6	0,7755	0,002585	0,4936	1273,8730	519,8361	1375,8568
112.5	1.7	0,7867	0,002622	0,4711	1311,3107	535,1938	1416,3221
112.5	1.8	0,7970	0,002657	0,4506	1346,1198	549,4582	1453,9404
112.5	1.9	0,8064	0,002688	0,4317	1378,6048	562,7553	1489,0416
112.5	2	0,8152	0,002717	0,4143	1409,0705	575,2112	1521,9552
112.5	2.1	0,8234	0,002745	0,3982	1437,8214	586,9520	1553,0110
120	0	0,0069	0,000023	0,7316	0,0932	0,0530	0,1072
120	0.1	0,0708	0,000236	0,7318	9,2194	5,2446	10,6067
120	0.2	0,1376	0,000459	0,7316	37,2815	21,2088	42,8920
120	0.3	0,2061	0,000687	0,7312	83,9853	47,7783	96,6245
120	0.4	0,2751	0,000917	0,7312	149,0363	84,7859	171,4656
120	0.5	0,3438	0,001146	0,7314	232,3603	132,1898	267,3302
120	0.6	0,4123	0,001374	0,7299	334,7637	190,4514	385,1474

120	0.7	0,4806	0,001602	0,7242	455,2429	259,0080	523,7664
120	0.8	0,5449	0,001816	0,7101	584,6742	332,6967	672,7043
120	0.9	0,6013	0,002004	0,6847	711,8672	405,1774	819,0992
120	1	0,6473	0,002158	0,6526	825,4848	470,0003	949,9082
120	1.1	0,6823	0,002274	0,6193	917,2520	522,4459	1055,6046
120	1.2	0,7091	0,002364	0,5870	991,2866	564,8238	1140,9098
120	1.3	0,7310	0,002437	0,5569	1053,9331	600,7126	1213,1078
120	1.4	0,7494	0,002498	0,5291	1108,0488	631,7387	1275,4865
120	1.5	0,7652	0,002551	0,5036	1155,5084	658,9755	1330,2061
120	1.6	0,7789	0,002596	0,4803	1197,7424	683,2384	1378,9132
120	1.7	0,7911	0,002637	0,4590	1235,9353	705,2015	1422,9706
120	1.8	0,8021	0,002674	0,4395	1270,7323	725,2311	1463,1202
120	1.9	0,8120	0,002707	0,4216	1302,6436	743,6164	1499,9485
120	2	0,8211	0,002737	0,4050	1332,1793	760,6469	1534,0421
120	2.1	0,8295	0,002765	0,3897	1359,8496	776,6118	1565,9875
127.5	0	0,0073	0,000024	0,6881	0,0962	0,0732	0,1208
127.5	0.1	0,0754	0,000251	0,6881	9,7405	7,4076	12,2372
127.5	0.2	0,1463	0,000488	0,6880	38,4581	29,2593	48,3232
127.5	0.3	0,2190	0,000730	0,6880	86,3900	65,7301	108,5527
127.5	0.4	0,2925	0,000975	0,6878	153,6773	116,9215	193,0994
127.5	0.5	0,3658	0,001219	0,6875	240,1775	182,7268	301,7852
127.5	0.6	0,4380	0,001460	0,6872	344,6135	262,2052	433,0243
127.5	0.7	0,5072	0,001691	0,6863	462,7731	352,1837	581,5431
127.5	0.8	0,5681	0,001894	0,6811	579,8376	441,3916	728,7237
127.5	0.9	0,6159	0,002053	0,6681	681,4887	518,9220	856,5670
127.5	1	0,6526	0,002175	0,6473	766,0157	583,4208	962,8914
127.5	1.1	0,6813	0,002271	0,6204	835,3553	636,3123	1050,1009
127.5	1.2	0,7044	0,002348	0,5909	893,4255	680,5827	1123,1215
127.5	1.3	0,7239	0,002413	0,5623	944,0882	719,1868	1186,8160
127.5	1.4	0,7407	0,002469	0,5353	988,9999	753,3924	1243,2702
127.5	1.5	0,7554	0,002518	0,5101	1029,2319	784,0191	1293,8331
127.5	1.6	0,7685	0,002562	0,4868	1065,7203	811,7820	1339,6827
127.5	1.7	0,7804	0,002601	0,4653	1099,2718	837,2971	1381,8338
127.5	1.8	0,7911	0,002637	0,4456	1130,3103	860,8890	1420,8206
127.5	1.9	0,8010	0,002670	0,4274	1159,1642	882,8095	1457,0568
127.5	2	0,8101	0,002700	0,4105	1186,1619	903,3104	1490,9560
127.5	2.1	0,8186	0,002729	0,3949	1211,6317	922,6434	1522,9321

135	0	0,0065	0,000022	0,6883	0,0667	0,0661	0,0939
135	0.1	0,0665	0,000222	0,6883	6,6193	6,5602	9,3194
135	0.2	0,1293	0,000431	0,6882	26,6865	26,4471	37,5715
135	0.3	0,1936	0,000645	0,6881	60,1020	59,5628	84,6167
135	0.4	0,2584	0,000861	0,6880	106,6995	105,7435	150,2214
135	0.5	0,3229	0,001076	0,6878	166,4300	164,9411	234,3171
135	0.6	0,3874	0,001291	0,6872	239,7142	237,5721	337,4957
135	0.7	0,4519	0,001506	0,6848	326,2926	323,3830	459,3946
135	0.8	0,5144	0,001715	0,6765	422,7164	418,9783	595,1739
135	0.9	0,5724	0,001908	0,6589	523,5603	519,0077	737,2139
135	1	0,6222	0,002074	0,6340	618,6845	613,4434	871,2539
135	1.1	0,6615	0,002205	0,6054	699,1814	693,4656	984,7585
135	1.2	0,6921	0,002307	0,5758	765,7876	759,7627	1078,7354
135	1.3	0,7167	0,002389	0,5476	821,5331	815,2945	1157,4203
135	1.4	0,7369	0,002456	0,5213	868,9784	862,5985	1224,4180
135	1.5	0,7541	0,002514	0,4970	910,3487	903,8889	1282,8678
135	1.6	0,7690	0,002563	0,4745	946,9985	940,5092	1334,6774
135	1.7	0,7822	0,002607	0,4539	979,9589	973,4796	1381,2972
135	1.8	0,7939	0,002646	0,4349	1009,8369	1003,3985	1423,5796
135	1.9	0,8044	0,002681	0,4174	1037,1335	1030,7587	1462,2276
135	2	0,8141	0,002714	0,4013	1062,3501	1056,0533	1497,9441
135	2.1	0,8231	0,002744	0,3863	1085,9878	1079,7752	1531,4320
142.5	0	0,0069	0,000023	0,6580	0,0650	0,0841	0,1063
142.5	0.1	0,0709	0,000236	0,6580	6,4747	8,3733	10,5846
142.5	0.2	0,1376	0,000459	0,6579	26,0012	33,6241	42,5046
142.5	0.3	0,2061	0,000687	0,6579	58,5256	75,6840	95,6730
142.5	0.4	0,2752	0,000917	0,6578	103,9292	134,4004	169,8963
142.5	0.5	0,3440	0,001147	0,6575	162,1502	209,6944	265,0744
142.5	0.6	0,4123	0,001374	0,6572	233,3541	301,7820	381,4794
142.5	0.7	0,4796	0,001599	0,6562	316,0610	408,7663	516,7054
142.5	0.8	0,5412	0,001804	0,6511	401,9808	520,0055	657,2627
142.5	0.9	0,5928	0,001976	0,6389	482,1760	624,0028	788,5894
142.5	1	0,6340	0,002113	0,6197	551,9283	714,5868	902,9170
142.5	1.1	0,6659	0,002220	0,5953	608,8832	788,6240	996,3265
142.5	1.2	0,6909	0,002303	0,5686	655,9220	849,8064	1073,5011
142.5	1.3	0,7119	0,002373	0,5424	696,6855	902,8269	1140,3803
142.5	1.4	0,7299	0,002433	0,5175	732,6167	949,5553	1199,3258

142.5	1.5	0,7455	0,002485	0,4941	764,5925	991,1338	1251,7779
142.5	1.6	0,7592	0,002531	0,4724	793,4252	1028,6161	1299,0668
142.5	1.7	0,7716	0,002572	0,4522	819,8290	1062,9285	1342,3623
142.5	1.8	0,7828	0,002609	0,4336	844,1928	1094,5775	1382,3029
142.5	1.9	0,7930	0,002643	0,4165	866,8243	1123,9641	1419,3941
142.5	2	0,8025	0,002675	0,4005	888,0309	1151,4897	1454,1415
142.5	2.1	0,8114	0,002705	0,3858	908,1202	1177,5553	1487,0504
150	0	0,0062	0,000021	0,6463	0,0429	0,0738	0,0853
150	0.1	0,0636	0,000212	0,6462	4,2687	7,3469	8,4970
150	0.2	0,1235	0,000412	0,6463	17,1501	29,5132	34,1343
150	0.3	0,1850	0,000617	0,6463	38,6109	66,4441	76,8481
150	0.4	0,2470	0,000823	0,6461	68,5752	118,0111	136,4888
150	0.5	0,3087	0,001029	0,6458	107,0135	184,1643	212,9986
150	0.6	0,3703	0,001234	0,6456	154,0838	265,1683	306,6856
150	0.7	0,4319	0,001440	0,6454	209,7049	360,8835	417,3883
150	0.8	0,4925	0,001642	0,6430	272,6524	469,2384	542,7007
150	0.9	0,5503	0,001834	0,6359	340,4724	586,0505	677,7733
150	1	0,6017	0,002006	0,6222	406,9361	700,6235	810,2286
150	1.1	0,6440	0,002147	0,6015	466,0423	802,6378	928,1287
150	1.2	0,6777	0,002259	0,5767	516,4749	889,7944	1028,8248
150	1.3	0,7047	0,002349	0,5512	558,4853	962,4862	1112,7828
150	1.4	0,7265	0,002422	0,5264	593,9101	1023,8534	1183,6405
150	1.5	0,7450	0,002483	0,5028	624,7383	1077,3068	1245,3465
150	1.6	0,7609	0,002536	0,4806	651,9823	1124,5932	1299,9196
150	1.7	0,7749	0,002583	0,4601	676,3539	1166,9441	1348,7821
150	1.8	0,7873	0,002624	0,4410	698,3386	1205,1949	1392,9004
150	1.9	0,7984	0,002661	0,4234	718,3651	1240,0821	1433,1267
150	2	0,8085	0,002695	0,4070	736,8624	1272,3421	1470,3131
150	2.1	0,8180	0,002727	0,3918	754,2593	1302,7113	1505,3119
157.5	0	0,0066	0,000022	0,6496	0,0370	0,0894	0,0967
157.5	0.1	0,0677	0,000226	0,6496	3,6637	8,8486	9,5771
157.5	0.2	0,1316	0,000439	0,6495	14,7930	35,7379	38,6785
157.5	0.3	0,1971	0,000657	0,6495	33,3195	80,4983	87,1215
157.5	0.4	0,2631	0,000877	0,6494	59,1378	142,8710	154,6266
157.5	0.5	0,3288	0,001096	0,6491	92,2173	222,7816	241,1134
157.5	0.6	0,3943	0,001314	0,6489	132,8253	320,8939	347,2973
157.5	0.7	0,4595	0,001532	0,6480	180,5302	436,1846	472,0679

157.5	0.8	0,5209	0,001736	0,6433	231,8057	560,1446	606,2143
157.5	0.9	0,5749	0,001916	0,6318	282,4221	682,5275	738,6515
157.5	1	0,6197	0,002066	0,6137	328,4325	793,6233	858,8980
157.5	1.1	0,6548	0,002183	0,5903	366,9619	886,3289	959,2914
157.5	1.2	0,6824	0,002275	0,5644	399,1388	963,4334	1042,8402
157.5	1.3	0,7052	0,002351	0,5389	426,8662	1029,6454	1114,6230
157.5	1.4	0,7245	0,002415	0,5145	451,1410	1087,4605	1177,3269
157.5	1.5	0,7412	0,002471	0,4916	472,6877	1138,6997	1232,9114
157.5	1.6	0,7558	0,002519	0,4702	492,0488	1184,6984	1282,8182
157.5	1.7	0,7688	0,002563	0,4504	509,6762	1226,5617	1328,2407
157.5	1.8	0,7806	0,002602	0,4321	525,8419	1264,9567	1369,8997
157.5	1.9	0,7912	0,002637	0,4151	540,7733	1300,4415	1408,3976
157.5	2	0,8011	0,002670	0,3994	554,6976	1333,5740	1444,3369
157.5	2.1	0,8103	0,002701	0,3848	567,8418	1364,9123	1478,3199
165	0	0,0060	0,000020	0,6177	0,0209	0,0778	0,0805
165	0.1	0,0618	0,000206	0,6176	2,0882	7,7549	8,0312
165	0.2	0,1202	0,000401	0,6176	8,3759	31,1026	32,2107
165	0.3	0,1800	0,000600	0,6176	18,8540	70,0112	72,5055
165	0.4	0,2403	0,000801	0,6175	33,4927	124,3711	128,8019
165	0.5	0,3004	0,001001	0,6173	52,2785	194,1331	201,0490
165	0.6	0,3603	0,001201	0,6171	75,2633	279,4896	289,4460
165	0.7	0,4203	0,001401	0,6170	102,4243	380,3568	393,9062
165	0.8	0,4796	0,001599	0,6157	133,3758	495,3051	512,9485
165	0.9	0,5368	0,001789	0,6113	167,1730	620,8456	642,9588
165	1	0,5888	0,001963	0,6017	200,9984	746,6005	773,1834
165	1.1	0,6326	0,002109	0,5855	231,9822	861,9866	892,6571
165	1.2	0,6682	0,002227	0,5648	258,9153	962,4893	996,7060
165	1.3	0,6965	0,002322	0,5420	281,3433	1046,3680	1083,5313
165	1.4	0,7193	0,002398	0,5189	300,1679	1116,9115	1156,5431
165	1.5	0,7386	0,002462	0,4967	316,4930	1178,1710	1219,9404
165	1.6	0,7551	0,002517	0,4756	330,8751	1232,2186	1275,8687
165	1.7	0,7695	0,002565	0,4558	343,7030	1280,5125	1325,8371
165	1.8	0,7823	0,002608	0,4374	355,2415	1324,0353	1370,8633
165	1.9	0,7937	0,002646	0,4202	365,7241	1363,6508	1411,8419
165	2	0,8041	0,002680	0,4043	375,3846	1400,2225	1449,6678
165	2.1	0,8138	0,002713	0,3895	384,4565	1434,6142	1485,2356
172.5	0	0,0065	0,000022	0,6010	0,0122	0,0934	0,0942

172.5	0.1	0,0668	0,000223	0,6009	1,2106	9,2590	9,3378
172.5	0.2	0,1299	0,000433	0,6010	4,8844	37,3669	37,6848
172.5	0.3	0,1946	0,000649	0,6010	11,0008	84,1614	84,8773
172.5	0.4	0,2597	0,000866	0,6009	19,5269	149,3867	150,6576
172.5	0.5	0,3246	0,001082	0,6006	30,4538	232,9732	234,9552
172.5	0.6	0,3893	0,001298	0,6005	43,8671	335,5951	338,4500
172.5	0.7	0,4537	0,001512	0,6004	59,6397	456,2501	460,1315
172.5	0.8	0,5146	0,001715	0,5995	76,6972	586,4849	591,4786
172.5	0.9	0,5686	0,001895	0,5964	93,7162	715,9605	722,0679
172.5	1	0,6137	0,002046	0,5888	109,3222	834,2457	841,3782
172.5	1.1	0,6492	0,002164	0,5751	122,4722	933,5196	941,5191
172.5	1.2	0,6773	0,002258	0,5568	133,4991	1016,4942	1025,2231
172.5	1.3	0,7005	0,002335	0,5358	143,0119	1087,9628	1097,3220
172.5	1.4	0,7203	0,002401	0,5138	151,3461	1150,5113	1160,4231
172.5	1.5	0,7373	0,002458	0,4924	158,7527	1206,0488	1216,4523
172.5	1.6	0,7523	0,002508	0,4719	165,4156	1255,9862	1266,8322
172.5	1.7	0,7656	0,002552	0,4527	171,4880	1301,4972	1312,7464
172.5	1.8	0,7777	0,002592	0,4346	177,0654	1343,3063	1354,9258
172.5	1.9	0,7887	0,002629	0,4177	182,2290	1382,0258	1393,9880
172.5	2	0,7988	0,002663	0,4021	187,0600	1418,2679	1430,5507
172.5	2.1	0,8083	0,002694	0,3875	191,6396	1452,6449	1465,2314
180	0	0,0059	0,000020	0,5949	0,0000	0,0788	0,0788
180	0.1	0,0612	0,000204	0,5949	0,0000	7,8609	7,8609
180	0.2	0,1190	0,000397	0,5949	-0,0003	31,5054	31,5054
180	0.3	0,1782	0,000594	0,5949	-0,0009	70,9131	70,9131
180	0.4	0,2379	0,000793	0,5948	-0,0014	125,9851	125,9851
180	0.5	0,2974	0,000991	0,5946	-0,0020	196,6731	196,6731
180	0.6	0,3567	0,001189	0,5945	-0,0034	283,1316	283,1316
180	0.7	0,4161	0,001387	0,5944	-0,0061	385,2904	385,2904
180	0.8	0,4749	0,001583	0,5937	-0,0070	501,9794	501,9794
180	0.9	0,5319	0,001773	0,5909	-0,0052	630,0264	630,0264
180	1	0,5840	0,001947	0,5840	-0,0106	759,3525	759,3525
180	1.1	0,6285	0,002095	0,5714	-0,0319	879,4105	879,4105
180	1.2	0,6648	0,002216	0,5540	-0,0634	984,6866	984,6866
180	1.3	0,6937	0,002312	0,5336	-0,0963	1072,4630	1072,4630
180	1.4	0,7169	0,002390	0,5121	-0,1256	1146,1735	1146,1735
180	1.5	0,7364	0,002455	0,4909	-0,1480	1210,2227	1210,2227

180	1.6	0,7532	0,002511	0,4708	-0,1624	1266,7463	1266,7463
180	1.7	0,7679	0,002560	0,4517	-0,1685	1317,2110	1317,2110
180	1.8	0,7808	0,002603	0,4338	-0,1674	1362,6737	1362,6737
180	1.9	0,7924	0,002641	0,4171	-0,1605	1404,0891	1404,0891
180	2	0,8030	0,002677	0,4015	-0,1491	1442,4118	1442,4118
180	2.1	0,8130	0,002710	0,3871	-0,1348	1478,5966	1478,5966



**ДОДАТОК В**  
**РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОЇ СИЛИ ДРК ТА ЇЇ**  
**СКЛАДОВИХ ВІДНОСНО КІЛЬКОСТІ ЗКОМУТОВАНИХ ГРУП**  
**КОТУШОК СТАТОРА**

$N_{gp}$  – кількість груп зкомутуваних котушок,  $i_i$  – струм котушки,  
 $i_{заг}$  – загальний струм ДРК,  $F_y$  – тангенціальна сила,  $F_x$  – радіальна сила,  
 $F_{mag}$  – загальна магнітна сила.

$N_{gp}$	$i_i$ , А	$i_{заг}$ , А	$F_y$ , Н	$F_x$ , Н	$F_{mag}$ , Н
1	0.1	0.6	188,0847	-623,518	651,2681
1	0.2	1.2	600,5092	-1853,29	1948,148
1	0.3	1.8	1064,865	-3232,31	3403,198
1	0.4	2.4	1487,517	-4505,58	4744,784
1	0.5	3	1811,659	-5478,74	5770,499
1	0.6	3.6	2042,12	-6159,11	6488,83
1	0.7	4.2	2216,743	-6670,62	7029,308
1	0.8	4.2	2357,887	-7081,48	7463,712
1	0.9	5.4	2477,076	-7427,41	7829,578
1	1	6	2580,943	-7728,53	8148,096
1	1.1	6.4	2673,454	-7996,57	8431,635
1	1.2	7.2	2757,03	-8238,5	8687,583
1	1.3	7.8	2833,296	-8459	8920,888
1	1.4	8.4	2903,399	-8661,56	9135,228
1	1.5	9	2968,24	-8848,92	9333,478
1	1.6	9.6	3028,531	-9023,18	9517,865
2	0.1	1.2	352,9159	-714,895	797,2609
2	0.2	2.4	1261,448	-2220,01	2553,368
2	0.3	3.6	2551,612	-4053,99	4790,155
2	0.4	4.8	4054,3	-5901,35	7159,842
2	0.5	6	5461,536	-7417,38	9211,184
2	0.6	7.2	6592,436	-8533,87	10783,65
2	0.7	8.4	7451,237	-9369,12	11970,86
2	0.8	9.6	8113,731	-10026,5	12898,16
2	0.9	10.8	8650,655	-10569,7	13658,39
2	1	12	9103,569	-11035,6	14305,91
2	1.1	13.2	9497,155	-11445,9	14872,93

2	1.2	14.4	9846,619	-11813,6	15379,08
2	1.3	15.6	10161,6	-12146,9	15836,83
2	1.4	16.8	10448,55	-12451,9	16254,88
2	1.5	18	10712,14	-12733	16639,69
2	1.6	19.2	10955,91	-12993,8	16996,19
3	0.1	1.8	438,4022	-689,842	817,3606
3	0.2	3.6	1603,219	-2118,99	2657,15
3	0.3	5.4	3320,134	-3825,31	5065,207
3	0.4	7.2	5417,733	-5492,72	7715,035
3	0.5	9	7582,237	-6776,82	10169,35
3	0.6	10.8	9586,644	-7617,74	12244,74
3	0.7	12.6	11321,6	-8161,61	13956,73
3	0.8	14.4	12762,13	-8547,26	15359,94
3	0.9	16.2	13933,39	-8862,95	16513,37
3	1	18	14895,03	-9146,25	17479,01
3	1.1	19.8	15707,72	-9406,55	18308,9
3	1.2	21.6	16412,82	-9647,3	19038,15
3	1.3	23.4	17037	-9870,56	19689,78
3	1.4	25.2	17598,09	-10078,1	20279,59
3	1.5	27	18108,35	-10271,7	20818,73
3	1.6	28.8	18576,53	-10452,7	21315,4
4	0.1	2.4	465,0305	-637,743	789,284
4	0.2	4.8	1709,763	-1910,7	2563,992
4	0.3	7.2	3559,797	-3356,3	4892,532
4	0.4	9.6	5843,135	-4657,99	7472,557
4	0.5	12	8245,031	-5472,06	9895,656
4	0.6	14.4	10538,26	-5739,61	11999,92
4	0.7	16.8	12607,38	-5616,97	13802,04
4	0.8	19.2	14403,87	-5285,75	15343,1
4	0.9	21.6	15916,61	-4906,26	16655,63
4	1	24	17174,55	-4580,47	17774,87
4	1.1	26.4	18231,41	-4337,4	18740,26
4	1.2	28.8	19139,88	-4159,09	19586,55
4	1.3	31.2	19936,95	-4025,96	20339,38
4	1.4	33.6	20648,02	-3924,28	21017,63
4	1.5	36	21290,86	-3844,47	21635,17
4	1.6	38.4	21877,96	-3780,18	22202,14

**ДОДАТОК Г**  
**СПИСОК ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ НАЛАШТУВАННЯ**  
**РОБОТИ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО**  
**КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСУ З ПІДСИЛЮВАЧЕМ РП НА БАЗІ ДРК**

$U = 400$	$T_{wheel} = 1200$	$ang\_switch\_off = 135$
$R = 200$	$Tdmax = 450$	$Pdr = 1000$
$Rsint = 0.21$	$Tdmin = 0$	$Idr = 0.5$
$Rrext = 0.2099$	$m\_trol = 18200$	$Ddr = 200$
$Rrint = 0.17$	$Gk = (9.81 * m\_trol * 0.36) / 2$	$Prot = 800$
$e = 0.0002$	$l\_c = 0.125$	$Irot = 0.5$
$m = 25$	$r\_k = 0.4785$	$Drot = 20$
$J = m * ((Rrint^2 + Rrext^2) / 2)$	$a\_sh = 4$	$Pt = 2000$
$Jwh = 0.05$	$y\_sh = 1$	$It = 0.3$
$k = (Rsint - Rrext) / Rrext$	$b\_sh = 2.5$	$Dt = 50$
$i\_wheel = 23.2$	$ang\_switch\_on = 0$	

де  $U$  – напруга живлення, В;  $R$  – опір котушки статора, Ом;  $Rsint$  – внутрішній радіус розточки статора, м;  $Rrext$  – зовнішній радіус ротора, м;  $Rrint$  – внутрішній радіус ротора, м;  $e$  – ексцентриситет, м;  $m$  – маса ротора, кг;  $J$  – приведений момент інерції до валу ротора, кг·м<sup>2</sup>;  $Jwh$  – приведений момент інерції керованих коліс, кг·м<sup>2</sup>;  $k$  – коефіцієнт редукції частоти обертання ДРК;  $i\_wheel$  – передаточне відношення рульового приводу;  $Tdmin$ ,  $Tdmax$  – мінімальне та максимальне значення моменту на рульовому колесі, Н·м;  $m\_trol$  – маса тролейбусу, кг;  $Gk$  – навантаження на керовану вісь, Н;  $l\_c$  – довжина цапфи, м;  $r\_k$  – радіус керованих коліс, м;  $a\_sh$  – кут поперечного нахилу шворня, град;  $y\_sh$  – кут розвалу керованого колеса, град.  $b\_sh$  – кут повздовжнього нахилу шворня, град;  $ang\_switch\_on$ ,  $ang\_switch\_off$  – кути комутації котушок статора, град;  $Pdr$ ,  $Idr$ ,  $Ddr$ ,  $Prot$ ,  $Irot$ ,  $Drot$ ,  $Pt$ ,  $It$ ,  $Dt$  – коефіцієнти ПІД-регуляторів.

**ДОДАТОК Г**  
**РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ**  
**ПІДСИЛЮВАЧА РП НА БАЗІ ДРК**

$w_{\text{вод}}$  – частота обертання рульового колеса,  $v_{\text{трол}}$  – лінійна швидкість руху тролейбуса,  $i_{\text{ДРК}}$  – струм двигуна,  $P_e$  – електрична потужність.

$v_{\text{трол}}$ , м/с	$w_{\text{вод}}$ , рад/с	$i_{\text{ДРК}}$ , А	$P_e$ , Вт
1	0,65	9,9100	1080,2880
1	0,6	9,2345	938,0289
1	0,55	8,5136	797,2927
1	0,5	7,7244	656,3251
1	0,45	6,8582	517,3790
1	0,4	5,9222	385,7939
1	0,35	4,8480	258,5357
1	0,3	3,4634	131,9471
1	0,25	0,8566	8,0719
1	0,2	0,5117	3,1134
1,2	0,65	8,8890	869,1653
1,2	0,6	8,2347	745,9216
1,2	0,55	7,5428	625,8264
1,2	0,5	6,7906	507,2281
1,2	0,45	5,9866	394,2321
1,2	0,4	5,0790	283,7542
1,2	0,35	4,0527	180,6666
1,2	0,3	2,4082	63,7936
1,2	0,25	0,5096	2,8561
1,2	0,2	0,1216	0,8123
1,4	0,65	8,0107	705,8876
1,4	0,6	7,3769	598,6103
1,4	0,55	6,7106	495,3540
1,4	0,5	5,9937	395,1750
1,4	0,45	5,2202	299,7568
1,4	0,4	4,3273	205,9829
1,4	0,35	3,2311	114,8374
1,4	0,3	1,4820	24,1610
1,4	0,25	0,1293	0,1840
1,6	0,2	0	0
1,6	0,65	7,2703	581,4255
1,6	0,6	6,6571	487,4818
1,6	0,55	6,0134	397,7700
1,6	0,5	5,3276	312,2132

1,6	0,45	4,5571	228,4367
1,6	0,4	3,6611	147,4366
1,6	0,35	2,3805	62,3323
1,6	0,3	0,7057	5,4785
1,6	0,25	0,2511	0,6935
1,6	0,2	0	0
1,8	0,65	6,6521	486,7497
1,8	0,6	6,0597	403,9227
1,8	0,55	5,4353	324,9690
1,8	0,5	4,7710	250,3898
1,8	0,45	3,9858	174,7552
1,8	0,4	3,0611	103,0718
1,8	0,35	1,4904	24,4356
1,8	0,3	0,1263	0,1755
1,8	0,25	0,2186	0,5257
1,8	0,2	0	0
2	0,65	6,1262	412,8307
2	0,6	5,5540	339,3198
2	0,55	4,9437	268,8458
2	0,5	4,2827	201,7521
2	0,45	3,4798	133,1960
2	0,4	2,4835	67,8453
2	0,35	0,4702	2,4316
2	0,3	0,2488	0,6811
2	0,25	0,0750	0,0619
2	0,2	0	0
2,2	0,65	5,6554	351,8246
2,2	0,6	5,1005	286,1675
2,2	0,55	4,4961	222,3680
2,2	0,5	3,8110	159,7608
2,2	0,45	2,9971	98,8080
2,2	0,4	1,8605	38,0751
2,2	0,35	0,6045	4,0199
2,2	0,3	0,2779	0,8494
2,2	0,25	0,1003	0,1106
2,2	0,2	0	0
2,4	0,65	5,2278	300,6286
2,4	0,6	4,6845	241,3922
2,4	0,55	4,0765	182,7959
2,4	0,5	3,3511	123,5313
2,4	0,45	2,5028	68,9020
2,4	0,4	1,1880	15,5258
2,4	0,35	0,3995	1,7560

2,4	0,3	0,1455	0,2329
2,4	0,25	0,0689	0,0522
2,4	0,2	0	0
2,6	0,65	4,8368	257,3390
2,6	0,6	4,2964	203,0491
2,6	0,55	3,6741	148,4922
2,6	0,5	2,9160	93,5331
2,6	0,45	1,9422	41,4925
2,6	0,4	0,5349	3,1473
2,6	0,35	0,2985	0,9800
2,6	0,3	0,1410	0,2187
2,6	0,25	0,0433	0,0206
2,6	0,2	0	0
2,8	0,65	4,4758	220,3598
2,8	0,6	3,9275	169,6789
2,8	0,55	3,2821	118,4909
2,8	0,5	2,5022	68,8716
2,8	0,45	1,2710	17,7708
2,8	0,4	0,1227	0,1656
2,8	0,35	0,2963	0,9657
2,8	0,3	0,1320	0,1916
2,8	0,25	0,0452	0,0225
2,8	0,2	0	0
3	0,65	4,1385	188,4035
3	0,6	3,5715	140,3079
3	0,55	2,8998	92,4972
3	0,5	2,0734	47,2878
3	0,45	0,4375	2,1055
3	0,4	0,1972	0,4277
3	0,35	0,0000	0,0000
3	0,3	0,0274	0,0082
3	0,25	0,0083	0,0007
3	0,2	0	0
3,2	0,65	3,8172	160,2814
3,2	0,6	3,2215	114,1594
3,2	0,55	2,5236	70,0543
3,2	0,5	1,5776	27,3772
3,2	0,45	0,5021	2,7736
3,2	0,4	0,2358	0,6114
3,2	0,35	0,1722	0,3263
3,2	0,3	0,0713	0,0560
3,2	0,25	0,0276	0,0084
3,2	0,2	0	0

3,4	0,65	3,5052	135,1488
3,4	0,6	2,8787	91,1591
3,4	0,55	2,1307	49,9405
3,4	0,5	1,0175	11,3891
3,4	0,45	0,3363	1,2444
3,4	0,4	0,1171	0,1509
3,4	0,35	0,1077	0,1275
3,4	0,3	0,0463	0,0236
3,4	0,25	0,0169	0,0031
3,4	0,2	0	0
3,6	0,65	3,1947	112,2680
3,6	0,6	2,5473	71,3775
3,6	0,55	1,6746	30,8453
3,6	0,5	0,4612	2,3399
3,6	0,45	0,2516	0,6965
3,6	0,4	0,1314	0,1900
3,6	0,35	0,0800	0,0704
3,6	0,3	0,0316	0,0110
3,6	0,25	0,0132	0,0019
3,6	0,2	0	0
3,8	0,65	2,8825	91,4000
3,8	0,6	2,2190	54,1657
3,8	0,55	1,1206	13,8142
3,8	0,5	0,1055	0,1224
3,8	0,45	0,2499	0,6871
3,8	0,4	0,1195	0,1572
3,8	0,35	0,0795	0,0695
3,8	0,3	0,0322	0,0114
3,8	0,25	0,0129	0,0018
3,8	0,2	0	0
4	0,65	2,5727	72,8042
4	0,6	1,8625	38,1560
4	0,55	0,4521	2,2488
4	0,5	0,1601	0,2821
4	0,45	0,0000	0,0000
4	0,4	0,0222	0,0054
4	0,35	0	0
4	0,3	0	0
4	0,25	0	0
4	0,2	0	0
4,2	0,65	2,2668	56,5239
4,2	0,6	1,4345	22,6360
4,2	0,55	0,3864	1,6426

4,2	0,5	0,1957	0,4211
4,2	0,45	0,1463	0,2353
4,2	0,4	0,0656	0,0473
4,2	0,35	0,0465	0,0238
4,2	0,3	0	0
4,2	0,25	0	0
4,2	0,2	0	0
4,4	0,65	1,9459	41,6514
4,4	0,6	0,9361	9,6398
4,4	0,55	0,2752	0,8334
4,4	0,5	0,0956	0,1006
4,4	0,45	0,0925	0,0941
4,4	0,4	0,0429	0,0202
4,4	0,35	0	0
4,4	0,3	0	0
4,4	0,25	0	0
4,4	0,2	0	0
4,6	0,65	1,5698	27,1080
4,6	0,6	0,4026	1,7834
4,6	0,55	0,2155	0,5108
4,6	0,5	0,1180	0,1533
4,6	0,45	0,0717	0,0565
4,6	0,4	0	0
4,6	0,35	0	0
4,6	0,3	0	0
4,6	0,25	0	0
4,6	0,2	0	0
4,8	0,65	1,1011	13,3359
4,8	0,6	0,2574	0,7291
4,8	0,55	0,2328	0,5959
4,8	0,5	0,1139	0,1426
4,8	0,45	0	0
4,8	0,4	0	0
4,8	0,35	0	0
4,8	0,3	0	0
4,8	0,25	0	0
4,8	0,2	0	0
5	0,65	0,4572	2,2995
5	0,6	0,0978	0,1052
5	0,55	0	0
5	0,5	0	0
5	0,45	0	0
5	0,4	0	0



5	0,35	0	0
5	0,3	0	0
5	0,25	0	0
5	0,2	0	0

## ДОДАТОК Д

### АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ:

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор КП «Тролейбусне депо  
№2»

Липовий Д. В.

2021р.



м. Харків

#### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача  
Агаркова Івана Валентиновича  
«Удосконалення системи рульового керування тролейбусу шляхом  
використання двигуна з ротором, що котиться»

Комісія у складі заступника директора з технічних питань Ліфіренка Леоніда Михайловича та начальника технічного відділу Ковтуна Валерія Васильовича на основі вивчення представлених матеріалів дисертації здобувача Агаркова Івана Валентиновича визначила, що тема дисертаційної роботи є актуальною та науково обґрунтованою.

Надані матеріали можливо використовувати на курсах підготовки водіїв тролейбусів, які організовані на підприємстві, а також на заняттях з водіями, котрі бажають підвищити клас своєї професійної майстерності.

Заслуговують уваги методи оцінки технічного стану рульового керування, які доцільно було б експериментально перевірити на тролейбусах, що експлуатуються, з метою подальшого практичного запровадження в депо.

Враховуючи те, що рульове керування пов'язане з безпекою експлуатації рухомого складу, комісія вважає доцільним з даними матеріалами ознайомити вітчизняні установи і підприємства зайняті проєктуванням та виготовленням тролейбусів.

Підписи членів комісії

Л. М. Ліфіренко

В. В. Ковтун





**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор  
Харківського національного  
університету міського господарства  
імені О.М. Бекетова, проф.

*Г.В. Стадник*  
Г.В. Стадник

"\_\_" \_\_\_\_\_ 2021 р.

**АКТ**

про використання у навчальному процесі  
результатів дисертаційної роботи Агаркова Івана Валентиновича  
«Удосконалення системи рульового керування тролейбуса шляхом  
використання двигуна з ротором що котиться»  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Ректорат Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова підтверджує впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії аспіранта Агаркова Івана Валентиновича за темою **«Удосконалення системи рульового керування тролейбуса шляхом використання двигуна з ротором що котиться»**, зі спеціальності 275 – Транспортні технології (за видами), освітньо-наукова програма Транспортні технології. Електротранспорт, галузь знань 27 – Транспорт.

Запропоновані автором розроблені положення дисертації та методи розрахунку параметрів електромеханічних систем викладаються у дисциплінах «Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів», «Системи електропостачання в електричній інженерії» та використовувались в дисциплінах «Електропостачання транспорту», «Електротехнологічні установки», «Системи електропостачання в електромехатронних комплексах і системах». Також показані в роботі методи розрахунку та сучасний програмний комплекс пропонується для використання в дисциплінах «Спеціальні електричні машини», «Методи та розрахунки електромеханічних систем», «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з урахуванням відповідної освітньої програми.

Директор  
навчально-наукового інституту  
енергетичної, інформаційної  
та транспортної інфраструктури,  
к.т.н., доцент

*І.В. Білецький*  
І.В. Білецький

ДОДАТОК Е  
ПАТЕНТИ УКРАЇНИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ





## ДОДАТОК Є

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

#### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Павленко Т. П., Скуріхін В. І., Колотило В. І., Агарков І. В. Аналіз проблем системи рульового керування тролейбусів та перспективи їх вирішення. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*, 2018. Т. 1, № 32. С. 115–125.
2. Агарков І. В. Визначення механічних параметрів електричного підсилювача керма у системі рульового керування тролейбусу. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*, 2020. № 35. С. 52–59.
3. Скуріхін В. І., Сорока К. О., Агарков І. В. Математичне моделювання електропідсилювача керма транспортного засобу з черв'ячною передачею. *Міжнародний журнал «Світлотехніка та Електроенергетика»*. 2020. № 59. С. 101–107.
4. Агарков І. В. Моделювання рульового керування тролейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі електродвигуна з ротором, що котиться. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*, 2021. № 38. С. 88–106.

#### Наукові праці у виданнях іноземних держав або у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних:

5. 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.

#### Праці апробаційного характеру:

6. Агарков І. В. Перспективні рішення проблем системи рульового керування тролейбусів. *Сучасний рух науки : тези доп. IV міжнар. науково-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 6–7 груд. 2018 р.* С. 4–7.2

7. Агарков І. В., Павленко Т. П., Скуріхін В. І. Електричний підсилювач для рульового керування троллейбусу. *«Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні»*: Наук. пр. Міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 15–18 жовт. 2019 р. С. 18–21.

8. Aharkov I. V. Transient processes in the trolleybus steering system. *Young Researchers in the Global World : Vistas and Challenges : Book of Papers of the International Forum for Young Researchers*, Kharkiv, 11 April 2019. P. 144–146.

9. Агарков І. В., Павленко Т. П. Моделювання електричного підсилювача рульового керування троллейбусу. *Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту*: Всеукр. науково-практ. конф., м. Харків, 14–16 квіт. 2021 р. С. 23–27.

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

10. Пристрій для вимірювання механічної потужності та коефіцієнта корисної дії електродвигуна на базі датчика крутного моменту : пат. 124531 Україна : G01L 3/00. № u201711374 ; заявл. 20.11.2017 ; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7/2018.

11. Рульове керування троллейбуса з електромеханічним підсилювачем керма : пат. 139523 Україна : B62D 1/00. № u201906457 ; заявл. 10.06.2019 ; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1/2020.