

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛОБАТЮК ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 62-838

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: академік НАПН України,  
доктор технічних наук, професор  
**Мокін Борис Іванович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри відновлювальної енергетики та  
транспортних електричних систем і комплексів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Сінчук Олег Миколайович**,  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,  
завідувач кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем в промисловості та  
транспорті

кандидат технічних наук, доцент  
**Карплюк Леонід Федорович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри електромехатроніки та  
комп'ютеризованих електромеханічних систем

Захист відбудеться «27» жовтня 2017 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий « 26» вересня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Б. Бурикін

## ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нині автовиробники концентрують свою увагу на розробку та удосконалення електротехнічних комплексів електромобілів, але електромобілі випускаються лише легкові, для створення сили тяги в яких достатньо задіяти асинхронні електродвигуни, але коли дійде черга до створення вантажних електромобілів, то доведеться в якості тягових установок застосовувати електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, котрі мають кращі тягові характеристики ніж у асинхронних електродвигунів.

Тому задача оптимізувати режими роботу електротехнічного комплексу електромобіля з електроприводом постійного струму на основі розробки математичних моделей динаміки руху електромобіля та розробки обчислювального методу для побудови траєкторії оптимального руху є вкрай актуальною, особливо враховуючи те, що уже почали випускатись електробуси з електричною тягою, створюваною електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, та те, що, фактично, тролейбуси, тяга в яких створюється теж електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, також є підкласом електромобілів з тією лише різницею, що силовий електропривод в них отримує енергію не від акумуляторної батареї, а від контактної електромережі.

Для повноти розв'язання задачі пропонується розглядати як сам електромобіль, так і електромобіль, доповнений двигуном внутрішнього згорання, оскільки такі гібридні електромобілі є перехідною ланкою від транспортних засобів з тягою, створюваною лише двигунами внутрішнього згорання, до класичних електромобілів. Провівши декомпозицію задачі та синтез математичних моделей оптимального руху і гібридних електромобілів, отримаємо математичні моделі для оптимальної роботи електротехнічного комплексу в поєднанні з двигуном внутрішнього згорання, тобто, при усіх можливих варіантах компоновки силової установки електромобіля.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2013-2016 років, відповідно до наукового напрямку кафедри «Відновлювальна енергетика та транспортні електричні системи і комплекси».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є збільшення запасів ходу електромобіля за рахунок оптимізації режимів його електротехнічного комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- здійснити аналіз наукових робіт, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів, і дослідити та оцінити стан та характеристики сучасного електромобілебудування та електромобілів;
- здійснити синтез математичних моделей оптимального руху горизонтальною ділянкою дороги, на спуск та на підйом та розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху

- електромобіля з електроприводом постійного струму за критерієм мінімуму витрат енергії акумулятора;
- здійснити синтез моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом постійного струму у міському транспортному потоці за критерієм мінімуму витрат енергії джерела живлення та розробити методи їх ідентифікації;
  - здійснити синтез математичних моделей оптимального руху та розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху гібридного автомобіля з одночасно включеними системою електропривода та двигуна внутрішнього згорання за критеріями мінімуму витрат енергії акумулятора, що живить систему електропривода, та мінімуму витрат пального для двигуна внутрішнього згорання;
  - синтезувати систему керування електроприводом та двигуном внутрішнього згорання для реалізації моделей оптимального руху гібридного електромобіля;
  - розробити імітаційну модель для перевірки синтезованих математичних моделей на адекватність;
  - показати, що результати оптимізації, отримані для класичного електромобіля, можуть бути застосованими і для побудови траєкторій оптимального руху тролейбусів, які, хоч і отримують енергію з контактної електромережі, але теж, фактично, є підкласом електромобілів.

*Об'єктом дослідження* є процеси в системі електротехнічного комплексу електромобіля при можливих режимах роботи.

*Предмет дослідження* – математичні моделі оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля, методи їх ідентифікації та реалізації.

**Методи дослідження.** Під час досліджень використовувалися методи теорії електропривода для дослідження процесів в системі електропривода електромобіля, методи теоретичної механіки та математичного аналізу для дослідження такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електромобіля, яким є його механічна частина, методи аеродинаміки для дослідження впливу навколишнього середовища, методи оптимізації динамічних систем для синтезу моделей оптимального руху електромобіля, методи ідентифікації динамічних систем для ідентифікації синтезованих моделей оптимального руху електромобіля, методи теорії автоматичного керування для синтезу пристрою для реалізації моделей оптимального руху, імітаційне моделювання для оцінки адекватності синтезованих моделей.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше синтезовані моделі оптимального руху як завантаженого так і незавантаженого електромобіля з тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням за критерієм мінімуму витрат енергії силової

акумуляторної батареї під час руху: дорогою, яка має горизонтальні ділянки, на спуск та на підйом.

2. Вперше здійснено синтез закону та системи керування оптимальним рухом електромобіля, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, що дозволяє за будь якої швидкості електромобіля сформувавши такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії силового акумулятора.

3. Здійснено декомпозицію задачі оптимізації руху електромобіля, електротехнічна тягова установка якого доповнена двигуном внутрішнього згорання, що переводить її в клас гібридних, за умови, що гібридний електромобіль рухається дорогою, яка крім горизонтальних ділянок містить спуски та підйоми, чим охоплюються всі можливі випадки організації руху гібридного електромобіля за оптимальними законами.

4. Запропоновано обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданий час гібридного електромобіля з непрацюючою системою електропривода, та здійснено модифікацію даного методу, для випадку, коли досягнувши вказаного кінцевого пункту, гібридний електромобіль продовжує рух, що дозволяє визначати чисельні значення параметрів моделей оптимального руху за короткі проміжки часу.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблені методи та система оптимального керування електромобілем, що рухається як без перешкод горизонтальною ділянкою дороги або на спуск чи підйом, так і у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, дозволяють при будь-якій швидкості електромобіля сформувавши такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумулятора. А в разі доповнення електротехнічної тягової установки електромобіля двигуном внутрішнього згорання ці методи і система керування дозволяють забезпечити такі режими руху цього гібридного електромобіля, які не лише мінімізують витрати енергії силового акумулятора, але мінімізують і витрати пального для двигуна внутрішнього згорання. Оскільки математичні моделі руху електромобіля, оснащеного тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, оптимальні за критерієм мінімуму витрат енергії силової акумуляторної батареї, легко адаптуються і на такий клас електромобілів, яким є тролейбуси, тяговими електродвигунами яких теж є електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, з тією лише різницею, що при реалізації цих моделей оптимального руху досягається не мінімум витрат енергії силової акумуляторної батареї, а мінімум витрат енергії, яку споживає електропривод тролейбуса з контактної електричної мережі, то отримані в дисертації результати знайдуть практичне застосування ще задовго до того, як розпочнеться випуск вантажних електромобілів.

Більшість результатів, отриманих в дисертаційній роботі впроваджені у Вінницькому національному технічному університеті шляхом включення їх до навчальних курсів, присвячених вивченню електрообладнання автомобілів, методів ідентифікації та оптимізації електротехнічних комплексів та методології і організації наукових досліджень, окремі із них впроваджені шляхом використання їх при виконанні держбюджетної науково-дослідної теми «Інформаційна технологія обробки параметрів просторово-часових моделей даних динамічних багатозв'язних просторово-розподілених систем», номер державної реєстрації НДР: № 0115U00112, а також передані для впровадження в ТОВ «АТП Слободянюк» та у КП «Вінницька транспортна компанія».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні й практичні результати, а також відповідні висновки отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві автору належать: [5] – запропоновано формулювання задачі синтезу законів оптимального руху гібридного автомобіля як горизонтальною ділянкою дороги, так і на спусках та підйомах; [3] – запропоновано спосіб розв'язання системи двох нелінійних рівнянь з двома невідомими, складеними з використанням моделей динаміки електромобіля і граничних умов, [8] – запропоновано обчислювальні процедури методу ідентифікації, котрі дозволяють визначати чисельні значення параметрів та змінних моделей оптимального руху; [11] – запропоновано шляхи реалізації методу та системи оптимального керування електромобілем, адаптованих до різних режимів руху; [9] – запропоновано спосіб модифікації методу ідентифікації моделей оптимального руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода для випадку, коли в кінцевому пункті автомобіль не упиняється; [7] – показав як трансформуються синтезовані моделі до умов руху гібридного автомобіля за допомогою системи електропривода на спуск і на підйом; [6] – показав, як трансформуються синтезовані моделі до умов руху гібридного автомобіля за допомогою двигуна внутрішнього згорання на спуск і на підйом; [10] – здійснив інверсію розв'язаної задачі, що полягає у тому, що оптимальні значення витрат пального і струму визначаються для тих значень швидкості і прискорення гібридного автомобіля, яких бажає дотримуватись під час руху на підйом водій цього гібриду; [1] – побудовано закон зміни струму тягового електродвигуна постійного струму послідовного збудження для завантаженого електромобіля; [2] – побудовано закон зміни струму тягового електродвигуна постійного струму послідовного збудження для незавантаженого електромобіля; [4] – зазначив шляхи реалізації водієм електромобіля побудованого закону оптимального руху, [12] – здійснено узагальнення результатів, отриманих автором в інших роботах, що охарактеризовані вище.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні наукові положення дисертаційної роботи пройшли апробацію на щорічних науково-технічних конференціях Вінницького національного технічного університету у 2013-2016 роках та на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах, Вінниця 3-6 жовтня 2016р».

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 15 наукових працях, перших 11 із яких, входять до переліку наукових фахових видань України та НМБ РІНЦ, вісім із них [1 – 3, 7 – 11] опубліковані у фахових виданнях, що входять ще й до НМБ Scopus, а [12] до переліку НМБ Scopus, [13 – 15] є тезами доповідей.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (111 найменувань) і трьох додатків. Основний зміст викладений на 134 сторінках друкованого тексту, містить 31 рисунків, 8 таблиць. Загальний обсяг роботи 149 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** визначені актуальність поставленої задачі, мета, об'єкт, предмет і задачі дослідження, новизна та практичне значення результатів, їх апробація, публікації та результати впровадження.

**В першому розділі** дисертації на основі аналізу наукових робіт, опублікованих в іноземних наукових журналах, показано, що уже в найближчі 5-10 років електромобілі складуть серйозну конкуренцію автомобілям з двигунами внутрішнього згорання, а тому необхідно створювати математичні моделі процесів, що мають місце в електротехнічних системах електромобілів, і технічні рішення по їх впровадженню. І почати розробляти теорію оптимізації руху електромобілів потрібно зі створення моделей процесів, що протікають в електротехнічних системах електромобілів, тягове зусилля в яких створюється системами електроприводів з електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, оскільки саме така теорія матиме прикладне значення уже сьогодні, адже на усіх тролейбусах тягу створюють саме електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, а тролейбуси в класі електромобілів уже сьогодні мають широке застосування з тенденцією реконструювання частини їх в електробуси, в яких енергія в систему електропривода надходить не з контактної електромережі через тролєї, а від акумуляторів. Крім того, невдовзі розпочнеться і ера переходу на електричну тягу вантажних автомобілів та автобусів, для яких електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням в силу «м'якості» їх тягових характеристик та відсутності потреби в потужних, а тому габаритних конденсаторних батареях для створення електромагнітного поля в зазорі тягових асинхронних двигунів, що знайшли застосування в легкових електромобілях, матимуть значну перевагу в застосуванні.

Завершується перший розділ постановкою тих задач, які уже сформульовані у вступі в інтегральній оцінці зробленого в дисертації.

**В другому розділі** спочатку зформовано базові математичні моделі динаміки руху електромобіля вигляді –

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{k_D}{R} I \Phi(I) - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2, \quad (1)$$

- під час його руху горизонтальною ділянкою дороги, у вигляді –

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{k_D}{R} I \Phi(I) - k_0 F_G \cos \beta + F_G \sin \beta - k_1 V - k_2 V^2, \quad (2)$$

- під час руху на спуск та у вигляді –

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{k_D}{R} I \Phi(I) - k_0 F_G \cos \beta - F_G \sin \beta - k_1 V - k_2 V^2, \quad (3)$$

- під час руху на підйом; у цих рівняннях:  $m$  – маса електромобіля,  $V$  – швидкість з якою рухається електромобіль,  $F_0$  – сила, яка обумовлена тертям коліс електромобіля з покриттям дороги, і є пропорційною його вазі,

$F_1$  сила, що обумовлена тертям бічної поверхні електромобіля з повітрям, і є пропорційною швидкості його руху,  $F_2$  – сила, що обумовлена тиском набігаючого на поперечний переріз електромобіля потоку повітря, яка є пропорційною квадрату його швидкості,  $F_G$  вага електромобіля,  $k_0$  – табличний коефіцієнт, який залежить від матеріалу поверхні дороги,  $k_1$  – коефіцієнт, що залежить від площі бічної поверхні електромобіля,  $k_2$  – коефіцієнт, що залежить від площі поперечного перерізу електромобіля,  $R$  – радіус колеса,  $k_D$  – коефіцієнт, що визначається з паспортних даних електродвигуна,  $I$  – струм якоря електродвигуна,  $\Phi(I)$  – магнітний потік його індуктора, який згідно з кривою намагнічування, є функцією струму якоря, а  $\beta$  кут нахилу дорожнього полотна до горизонтальної площини.

В якості критерію, мінімізацією значень якого далі розв'язується задача оптимізації вибрано функціонал

$$E_t = \int_0^{T_t} U I dt = \int_0^{T_t} (U_B - \Delta U) I dt = \int_0^{T_t} U_B \left(1 - \frac{r_B}{U_B} I\right) I dt, \quad (4)$$

в якому  $E_t$  – кількість використаної електроенергії,  $T_t$  – час їзди електромобіля з використанням електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням,  $I$  – струм, який протікає в якорі електродвигуна,  $U$  – напруга, що прикладається до обмотки якоря електродвигуна,  $U_B$  – напруга акумуляторної батареї В, а  $r_B$  її внутрішній опір.

Коли водій веде електромобіль, його більш цікавить не кількість електроенергії, яку він використає, рухаючись протягом часу  $T_t$  а відстань  $L_t$  яку він проїде за цей час. Очевидно, що, знаючи швидкість руху електромобіля  $V$ , можемо цю відстань визначити за допомогою функціоналу

$$L_t = \int_0^{T_t} V dt. \quad (5)$$

Враховуючи функціонал (5), задача оптимізації переводиться в клас ізопериметричних, оскільки нам доведеться шукати такий закон зміни швидкості електромобіля, який мінімізує функціонал (4), за умови, що динаміка електромобіля описується рівняннями із множини (1) – (3), а відстань задається функціоналом (5).

Для того, щоб отримані результати могли бути представленими в найбільш узагальненому вигляді, в дисертації здійснено перехід до відносних



величин – відносної швидкості електромобіля  $v$ , відносного струму якоря його тягового електродвигуна  $i$ , відносної відстані  $l$ , пройденої електромобілем, відносного магнітного потоку  $\phi$  тягового електродвигуна, відносної енергії  $e$ , витраченої акумуляторною батареєю, та відносного часу  $\tau$ . У відносних величинах рівняння (1), (2), (3), (4), (5) набрали, відповідно, вигляд:

$$\frac{dv}{d\tau} = i\phi(i) - f_0 - f_1v - f_2v^2, \quad (6)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = i\phi(i) + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1v - f_2v^2, \quad (7)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = i\phi(i) - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1v - f_2v^2, \quad (8)$$

$$e_i = \int_0^{\tau_i} (1 - \alpha i) i d\tau, \quad (9)$$

$$l_i = \int_0^{\tau_i} v d\tau, \quad (10)$$

а крива намагнічування тягового електродвигуна у відносних одиницях була заданою відомою моделлю

$$\phi(i) = \begin{cases} -a_2 i^2 + b_2 i, & i \in [0, i_{cn}), \\ a_1 + b_1 i, & i \in [i_{cn}, \infty), \end{cases} \quad (11)$$

з врахуванням того, що на верхній гілці цієї моделі тяговий електродвигун працює тоді, коли він недовантажений, а на нижній, коли він працює в околі номінального режиму і вище.

Після приведення до відносних одиниць усіх необхідних співвідношень у другому розділі спочатку з застосуванням варіаційного методу оптимізації Лагранжа було здійснено синтез математичних моделей оптимального руху завантаженого електромобіля під час його руху горизонтальним відрізком дороги у вигляді

$$i(\tau) = \frac{1 - a_1 (C_2 e^{(f_1 + 2f_2v)\tau} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v})}{2\alpha + 2b_1 (C_2 e^{(f_1 + 2f_2v)\tau} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v})}, \quad (12)$$

$$v(\tau) = -(2f_2(2\alpha i - 1) + 2C_2 f_2 (f_1 \tau + 1)(2b_1 i + a_1) e^{f_1 \tau} (4C_2 f_2^2 \tau (f_1 \tau + 2)(2b_1 i + a_1) e^{f_1 \tau})^{-1} + \\ + [(2f_2(2\alpha i - 1) + 2C_2 f_2 (f_1 \tau + 1)(2b_1 i + a_1) e^{f_1 \tau} (4C_2 f_2^2 \tau (f_1 \tau + 2)(2b_1 i + a_1) e^{f_1 \tau})^{-1}]^2 - \\ - 2f_1(2\alpha i - 1) + (2b_1 i + a_1)(C_2 f_1 e^{f_1 \tau} - C_1)) (4C_2 f_2^2 \tau (f_1 \tau + 2)(2b_1 i + a_1) e^{f_1 \tau})^{-1})^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

в яких  $C_1, C_2$  - параметри, числові значення яких априорі невідомі, до визначення яких і зводиться задача ідентифікації цих моделей, яка в дисертаційній роботі розв'язується з використанням як лівої ( $\tau = 0$ ), так і правої ( $\tau = \tau_k$ ) граничних умов.

У цьому ж таки другому розділі дисертації побудовано метод ідентифікації отриманих моделей, алгоритм кого зводиться до розв'язання системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} F_1(a_1, b_1, \alpha, f_0, f_1, C_1, C_2) = 0, \\ F_2(a_1, b_1, \alpha, f_0, f_1, C_1, C_2, \tau_k) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

відносно невідомих параметрів  $C_1, C_2$ .

У цьому ж таки другому розділі дисертації розроблено і спосіб реалізації моделей оптимального руху, тобто побудовано закон керування оптимальним рухом електромобіля, з тяговим електродвигуном постійного струму з послідовним збудженням, підключеним до акумуляторної батареї згідно зі схемою, наведеною на рис. 1.

Рівняння другого закону Кірхгофа для силового контуру на рис.1 має вигляд

$$U_0 = I_{\text{я}} r_{\text{АБС}} + I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{оз}}) + I_{\text{я}} r_{\text{л}} + E_{\omega} + (L_{\text{я}} + L_{\text{оз}}) \frac{dI_{\text{я}}}{dt_{\text{я}}}, \quad (15)$$

де  $U_0$  - електрорушійна сила силової акумуляторної батареї,  $r_{\text{АБС}}$  - внутрішній активний опір акумуляторної батареї,  $r_{\text{л}}$  - активний опір лінії, що з'єднує силову акумуляторну батарею з вхідними клемми тягового електродвигуна,  $r_{\text{я}}$  - активний опір обмотки якоря тягового електродвигуна,  $L_{\text{я}}$  - індуктивність обмотки якоря тягового електродвигуна,  $r_{\text{оз}}$  - активний опір обмотки збудження тягового електродвигуна,  $L_{\text{оз}}$  - індуктивність обмотки збудження тягового електродвигуна,  $E_{\omega} = k_{\omega} \omega \Phi(I_{\text{оз}}) = k_{\omega} \omega \Phi(I_{\text{я}})$ , - електрорушійна сила обертання,  $\omega$  - кутова швидкість обертання якоря,  $k_{\omega}$  - коефіцієнт зв'язку між  $\omega, E_{\omega}$  та магнітним потоком  $\Phi(I_{\text{я}})$ .

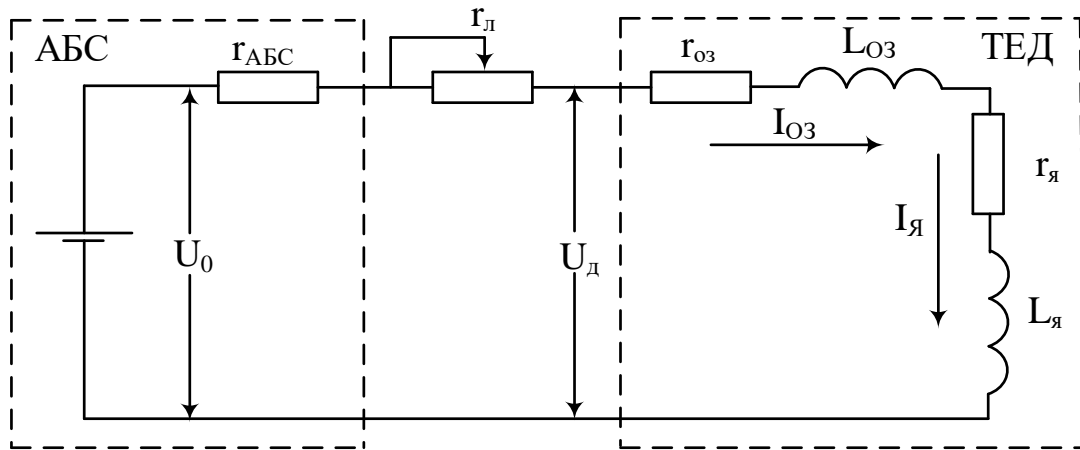


Рисунок 1 – Електрична схема основного силового контуру електропривода електромобіля

Із рівняння (15) видно, що задавати потрібне значення струму електродвигуна можна, або змінюючи опір лінії  $r_{\text{л}}$  між акумуляторною батареєю та його вхідними клемми, як показано на рис.3, або змінюючи напругу  $U_0$ , що подається на ці клемми, за допомогою керованого електронного підсилювача, як це показано на рис. 2 і як це і реалізовано в дисертації, де показано, що

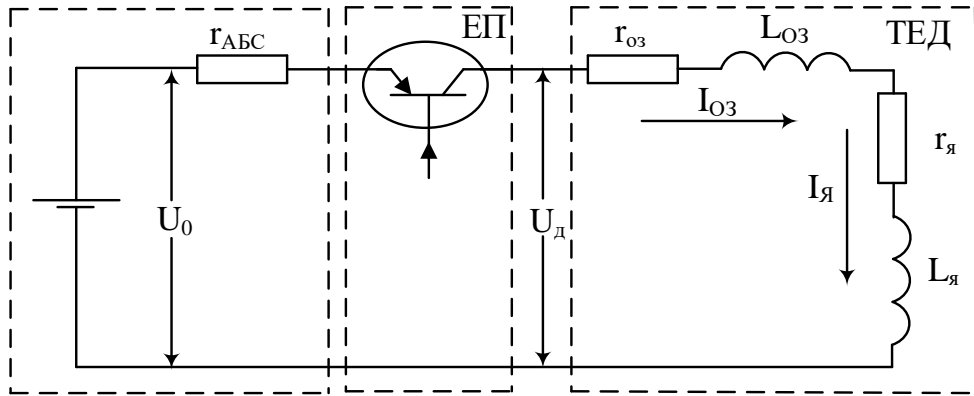


Рисунок 2 – Електрична схема основного силового контуру електропривода електромобіля з керованим електронним підсилювачем

після переведення рівняння (15) у відносні одиниці і підстановки виразу для оптимального струму (12) отримаємо рівняння

$$\begin{aligned}
 u^*(\tau) &= \theta i + \beta \frac{di}{d\tau} + \gamma v \varphi(i) = \theta i + \beta \frac{di}{d\tau} + \gamma v (a_1 + b_1) = \\
 &= \beta \frac{d}{d\tau} \left( \frac{f_1 + 2f_2 v - (f_1 + 2f_2 v) a_1 C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} + a_1 C_1}{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_1 C_2 (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_1 C_1} \right) + \\
 &+ (\theta + \gamma v b_1) \left( \frac{f_1 + 2f_2 v - (f_1 + 2f_2 v) a_1 C_2 e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} + a_1 C_1}{2\alpha (f_1 + 2f_2 v) + 2b_1 C_2 (f_1 + 2f_2 v) e^{(f_1 + 2f_2 v)\tau} - 2b_1 C_1} \right) + \gamma v a_1,
 \end{aligned} \quad (16)$$

яке у неявній формі задає закон формування оптимальної швидкості  $v = F_1^*(u^*, \tau)$ , який у дискретному часі  $k$  можна представити так -

$$v_{k+1} = F_1^{**}(u_k^*, v_k, k). \quad (17)$$

Нехай  $v_{k+1}$  – це реальне значення відносної швидкості руху електромобіля в дискретний момент часу  $k+1$ , яке водій бачить на електронному спідометрі електромобіля, установленому на панелі приладів, а

$$\Delta v_{k+1} = |v_{k+1}^p - v_{k+1}| \quad (18)$$

похибка, яка матиме місце в разі подачі в дискретний момент часу  $k$  на вхідні клеми тягового електродвигуна відносної напруги  $u_k^*$ . Тоді, установлюючи значення  $u_k^*$  таким, щоб виконувалась рівність (16), і мінімізувалась похибка (18), водій змушуватиме електромобіль рухатись із такою швидкістю, яка мінімізуватиме витрати енергії акумуляторної батареї.

У реальних умовах керування електромобіля водієм це означає: якщо водій, їдучи з відсноною швидкістю  $v_k$  в дискретний момент часу  $k$  за допомогою акселератора, з'єданого з керуючим органом електронного підсилювача, задасть таке значення  $u_k^*$ , яке забезпечить у дискретний момент часу  $k+1$  згідно з виразом (20) значення відносної швидкості  $v_{k+1}$ , виведене на дисплей бортового комп'ютера, контроль за встановленням якого згідно з критерієм (18) здійснюється за значенням  $v_{k+1}^p$ , що висвітлюється на електронному спідометрі електромобіля, то тяговий електродвигун електромобіля споживатиме струм, який забезпечуватиме програме руху з мінімальними витратами енергії акумулятора.

Проте автомобілі крайнє рідко рухаються навіть по горизонтальній площині з заданою швидкістю, зазвичай рух автомобілів обумовлений знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду. Тому в дисертаційній роботі показано, що при будь-якій швидкості електромобіля можна сформулювати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумулятора, та запропоновано метод і систему оптимального керування електроприводом електромобіля, які відрізнятимуться від розглянутих вище тим, що числові значення констант  $C_1, C_2$  в оптимальних моделях для їх ідентифікації визначаються не шляхом розв'язання системи рівнянь (14), а шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$v_{i+1} = -f_0\tau_c + (1 - f_1\tau_c)v_i - f_2\tau_c v_i^2 + a_i\tau_c \left[ \frac{1 - a_1 \left( C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)}{2\alpha + 2b_1 \left( C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)} \right] +$$

$$+ b_1\tau_c \left[ \frac{1 - a_1 \left( C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)}{2\alpha + 2b_1 \left( C_2 e^{(f_1+2f_2v_i)\tau_i} - \frac{C_1}{f_1 + 2f_2v_i} \right)} \right]^2, \quad i = 0, 1, \quad (19)$$

яку отримаємо з рівняння динаміки електромобіля, скориставшись наближеним значенням похідної швидкості у вигляді –

$$\frac{dv}{d\tau} \approx \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau_{i+1} - \tau_i} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau_c}, \quad i = 0, 1, \quad (20)$$

яке буде більшим нуля при розгоні електромобіля, меншим нуля при його гальмуванні і дорівнюватиме нулю під час їзди з незмінною швидкістю.

Тож розв'язуючи ці рівняння відносно вказаних констант, ми отримаємо їх чисельні значення  $C_1^*, C_2^*$ , які також є і розв'язком задачі ідентифікації оптимального струму, заданого моделлю (12) у цьому загальному випадку.

При цьому, необхідно зауважити стосовно цього розв'язку наступне:

1). розв'язки  $C_1^*, C_2^*$  рівнянь (19) потрібно знаходити окремо для розгону електромобіля, коли  $v_{i+1} > v_i$ , окремо для гальмування електромобіля, коли  $v_{i+1} < v_i$ , і окремо для руху з постійною швидкістю, коли  $v_{i+1} = v_i$ .

2). отримувати розв'язки для режиму розгону електромобіля, режиму гальмування та режиму руху з незмінною швидкістю необхідно лише один раз, використовуючи стаціонарний комп'ютер, і в базу бортового автомобільного комп'ютера необхідно занести ці розв'язки теж лише один раз, викликаючи їх з цієї бази кожного разу, коли необхідно за формулою (12) вирахувати значення оптимального струму в потрібний момент часу.

Далі в другому розділі за аналогічною методикою синтезуються моделі оптимального руху і закони оптимального руху, що їх реалізують, під час руху електромобіля на спуск та на підйом, причому алгоритм їх побудови майже не ускладнюється, оскільки моделі оптимального струму (12), і у цих випадках залишаються вірними, а змінюються лише базові рівняння динаміки електромобіля, які, набирають вигляд (7) або (8).

Але цілком зрозуміло, що при використанні в якості базових рівнянь динаміки електромобіля виразів (7) та (8) ми отримуємо при ідентифікації моделей оптимального струму (12) уже не пари числових констант  $C_1^*, C_2^*$ , які різняться для розгону, гальмування і руху з незмінною швидкістю, а залежності  $C_1^*(\beta), C_2^*(\beta)$ , для визначення яких необхідно, задаючись різними значеннями кута  $\beta = \beta_q, q = 1, 2, \dots, N$ , для кожного із цих значень визначити числа  $C_1^*(\beta_q), C_2^*(\beta_q)$ , які потім апроксимувати функціями  $C_1^*(\beta), C_2^*(\beta)$ , і в базу електро- більного комп'ютера закласти уже не три пари чисел  $C_1^*, C_2^*$  (для розгону, гальмування та руху з незмінною швидкістю) а три пари функцій  $C_1^*(\beta), C_2^*(\beta)$ , для цих же режимів руху.

Далі в другому розділі викладено алгоритм роботи системи керування електромобілем за законами оптимального руху, функціональна схема якої приведена на рис.3, на якому 1 – акумуляторна батарея, 2 – тяговий електродвигун, 3 – змінний опір в якірному ланцюгу електродвигуна, 4 – амперметр, 5 – бортовий комп'ютер, 6,7,8 –аналого-цифрові перетворювачі струму якоря, швидкості руху електромобіля та кута нахилу його повздовжньої осі до горизонтальної площини, 9,10,11 – вимірювальні перетворювачі (датчики) струму якоря, швидкості руху та кута нахилу, 12 – екран бортового комп'ютера, 13 – пристрій регулювання змінним опором, 14 – водій електромобіля. Із рис.3 видно, що змінювати струм якоря  $I$  тягового електродвигуна 2 при заданій швидкості руху  $V$  можна шляхом зміни опору 3 в якірному ланцюгу, замкненому на акумуляторну батарею 1. Цей змінний опір можна зробити регульованим, якщо його реалізувати на силовому транзисторі, сигнал на базу якого формуватиметься водієм електромобіля 14 за допомогою відповідного пристрою 13. Зміряний амперметром 4 струм якоря через перетворювач 9 і АЦП 6 уже у вигляді відносного струму  $i$  подається на бортовий комп'ютер 5 і відображається на його екрані 12 точкою, що рухається по відповідній траєкторії. На два інших входи бортового комп'ютера подається від датчика 11 через АЦП 8 кут нахилу повздовжньої осі електромобіля до горизонтальної площини, а від датчика 10 через АЦП 7 відносна швидкість руху електромобіля. Бортовий комп'ютер, використовуючи математичну модель динаміки електромобіля, розраховує оптимальне значення  $i_{opt}$  відносного струму, яке відповідає вимірним значенням відносної швидкості  $v$  та кута  $\beta$  нахилу осі електромобіля, і виводить його на екран у вигляді другої точки, що рухається по відповідній траєкторії. Водієві електромобіля необхідно, глядячи на екран бортового комп'ютера, шляхом впливу через пристрій керування (рукою чи ногою – залежно від конструкції) на змінний опір, так формувати струм якоря тягового електричного двигуна, щоб мінімізувати відстань на екрані комп'ютера між траєкторіями  $i$  та  $i_{opt}$ .

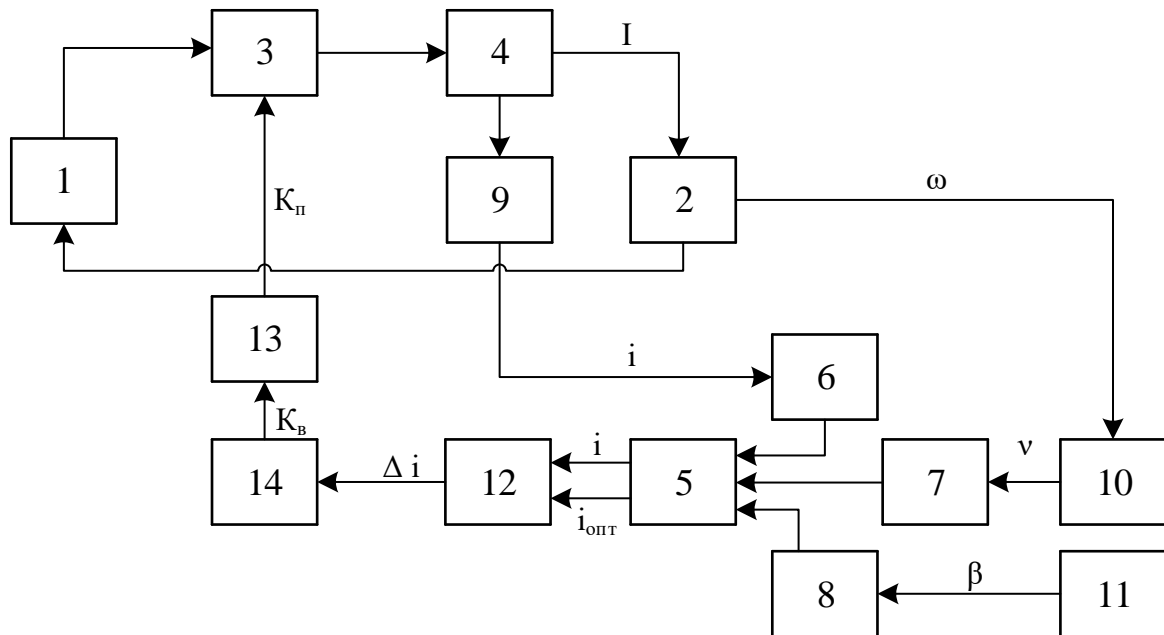


Рисунок 3 – Функціональна схема системи оптимального керування електромобілем

Цілковом очевидно, що в бортовий комп'ютер необхідно завантажити і інформацію про попередньо визначені на стаціонарному комп'ютері залежності  $C_1^*(\beta), C_2^*(\beta)$  для режимів розгону, гальмування та руху з незмінною швидкістю, і програми визначення значень оптимального струму за допомогою математичних моделей (12), і програму встановлення режиму руху в залежності від знаку похідної швидкості, і програму вибору пари констант із базових залежностей  $C_1^*(\beta), C_2^*(\beta)$  для конкретних значень кута нахилу.

Далі в другому розділі дисертації за викладеною вище процедурою здійснено синтез та ідентифікацію моделей оптимального руху горизонтальним відрізком дороги, а також під час руху на спуск і на підйом незавантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму з послідовним збудження, які є більш складними, оскільки в базових моделях динаміки крива намагнічування задається параболічною складовою виразу (11).

**Третій розділ** дисертації розпочинається з визначення поняття гібридного електромобіля як транспортного засобу, який приводиться в рух за допомогою тягового електроприводу, доповненого двигуном внутрішнього згорання, котрі споживають, відповідно, електричну енергію та продукти перегонки нафти, які узагальнено називають паливом. Потім в цьому розділі дається порівняльна характеристика класичних електромобілів та гібридних, визначаються режими, в яких в гібридному електромобілі доцільно створювати тягове зусилля лише одним із його двигунів, а коли доцільно, щоб вони одночасно працювали на спільний вал, і здійснюється декомпозиція задачі синтезу математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля.

Потім у третьому розділі формуються базові математичні моделі динаміки гібридного електромобіля у відносних одиницях. Цілковом очевидно, що при створенні тягового зусилля лише системою електропривода при виключеному двигуні внутрішнього згорання для моделей оптимального руху

гібридного електромобіля справедливими будуть усі ті співвідношення, які отримані в другому розділі для класичного електромобіля. Відмінності розпочинаються тоді, коли тягове зусилля у гібридному електромобілі створюється лише двигуном внутрішнього згорання при відключеній системі електропривода. У цьому випадку, оскільки тяговий момент для двигуна внутрішнього згорання, виходячи з загальних положень теоретичної механіки, задається виразом  $M_T = \frac{2\pi RP}{V}$ , в якому  $P$  – потужність двигуна, то за умови створення тягової сили за рахунок згорання  $Q$  одиниць палива за одиницю часу рівняння динаміки електромобіля матиме вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{2\pi P}{V} - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2 = 2\pi k_p \frac{Q}{V} - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2, \quad (21)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт пропорційності між потоком палива  $Q$  та створюваною цим потоком потужністю  $P$ , яке у відносних одиницях перетворюється у рівняння

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{q}{v} - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \quad (22)$$

під час руху горизонтальним відрізком дороги, у рівняння

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{q}{v} + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (23)$$

під час руху на спуск та у рівняння

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{q}{v} - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (24)$$

під час руху на підйом – у всіх цих рівняннях  $q$  – це відносні витрати пального. А критерієм оптимізації у цьому випадку буде функціонал

$$e_q = \int_0^{\tau_q} q d\tau. \quad (25)$$

Задача мінімізації критерію (25) з обмеженнями у вигляді одного із рівнянь динаміки (22), (23) чи (24) та ізопериметричного обмеження за відстанню, яку необхідно подолати, розв’язана в дисертації за допомогою того ж таки варіаційного методу Лагранжа. В результаті її розв’язання отримані моделі оптимального руху  $v(\tau), q(\tau)$  як для руху горизонтальним відрізком дороги так і для руху на спуск і на підйом. Наприклад, встановлено, що параметри оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода пов’язані між собою рівнянням

$$v = \left( \frac{q^3}{8C_2^3} - \frac{3q^2}{2C_2} (\tau + C_1) + \left( \left( -\frac{q^3}{8C_2^3} + \frac{3q^2}{2C_2} (\tau + C_1) \right)^2 + \left( -\frac{q^2}{4C_2^2} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} + \right. \\ \left. + \left( \frac{q^3}{8C_2^3} - \frac{3q^2}{2C_2} (\tau + C_1) - \left( \left( -\frac{q^3}{8C_2^3} + \frac{3q^2}{2C_2} (\tau + C_1) \right)^2 + \left( -\frac{q^2}{4C_2^2} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{q}{2C_2} \right), \quad (26)$$

яке являє собою математичну модель оптимальної швидкості руху гібридного автомобіля при виключеній системі електропривода протягом часу  $\tau_q$  під час його руху за рахунок лише двигуна внутрішнього згорання, при якій витрати пального будуть мінімальними.

Аналогічним шляхом в третьому розділі дисертації знаходяться і моделі оптимального руху гібридного електромобіля за рахунок лише двигуна

внутрішнього згорання і під час його руху на спуск та на підйом. У цьому ж розділі запропонований і обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода і створенням тягового зусилля лише за рахунок двигуна внутрішнього згорання.

У четвертому розділі дисертації здійснено синтез математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля на підйом в режимі одночасної роботи на спільний вал системи електропривода та двигуна внутрішнього згорання.

Вихідними для цієї задачі виступали наступні умови:

- математична модель динаміки гібридного електромобіля у вигляді –

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{q}{v} + i\varphi(i) - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (27)$$

- критерій оптимізації у вигляді –

$$e_{qi} = \int_0^{\tau_{qi}} q d\tau + \gamma \int_0^{\tau_{qi}} (1 - \alpha i) i d\tau, \quad (28)$$

- ізопериметричне обмеження у вигляді –

$$l_{qi} = \int_0^{\tau_{qi}} v d\tau. \quad (29)$$

А задача полягала у тому, щоб синтезувати залежності  $v(\tau), q(\tau), i(\tau)$ , які доставляють мінімум критерію (28), задовольняючи водночас обмеженням (29) та (27), які і являтимуть собою моделі оптимального руху гібридного електромобіля, коли він рухається на підйом за допомогою працюючих спільно на один вал двигуна внутрішнього згорання та системи електропривода. І розв'язання цієї оптимізаційної задачі теж здійснено варіаційним методом Лагранжа та отримані моделі оптимального руху, приведені в тексті дисертації. В цьому ж четвертому розділі побудований і обчислювальний метод для реалізації отриманих оптимальних моделей, який базується на тих же принципах, що уже розглянуті.

В п'ятому розділі розроблено ідеологію, методіку та імітаційні моделі для оцінки адекватності законів оптимального руху як класичного електромобіля, так і гібридного електромобіля, оснащеного додатково ще й двигуном внутрішнього згорання, в режимі створення тягового зусилля лише системою електропривода, лише двигуном внутрішнього згорання та при їх паралельній роботі на спільний вал, як під час руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги, так і на спуск або підйом. Із 10 розроблених в дисертаційні роботі структур імітаційних моделей наводимо лише першу, зображену на рис.4, яка є найбільш простою і яка реалізує в динаміці рівняння

$$v(\tau) = \int (a_1 i + b_1 i^2 - f_0 - f_1 v - f_2 v^2) d\tau, \quad (30)$$

яке буде справедливим для відносної швидкості завантаженого електромобіля під час його руху горизонтальним відрізком дороги. Цілком очевидно, що, якщо у вираз (30) замість  $i$  підставити  $i_{opt}$ , розраховане на комп'ютері (КОМ) з використанням моделі оптимального струму, то в разі правильності розв'язання задачі оптимізації, отримаємо тотожність



$$v_{opt}(\tau) = \int (a_1 i_{opt}(\tau) + b_1 (i_{opt}(\tau))^2 - f_0 - f_1 v_{opt}(\tau) - f_2 (v_{opt}(\tau))^2) d\tau, \quad (31)$$

яка буде справедливою для кожного моменту відносного часу  $\tau$ , а тому нев'язка  $\Delta v(\tau) = v_{opt}(\tau) - v(\tau)$  може служити критерієм адекватності моделі.

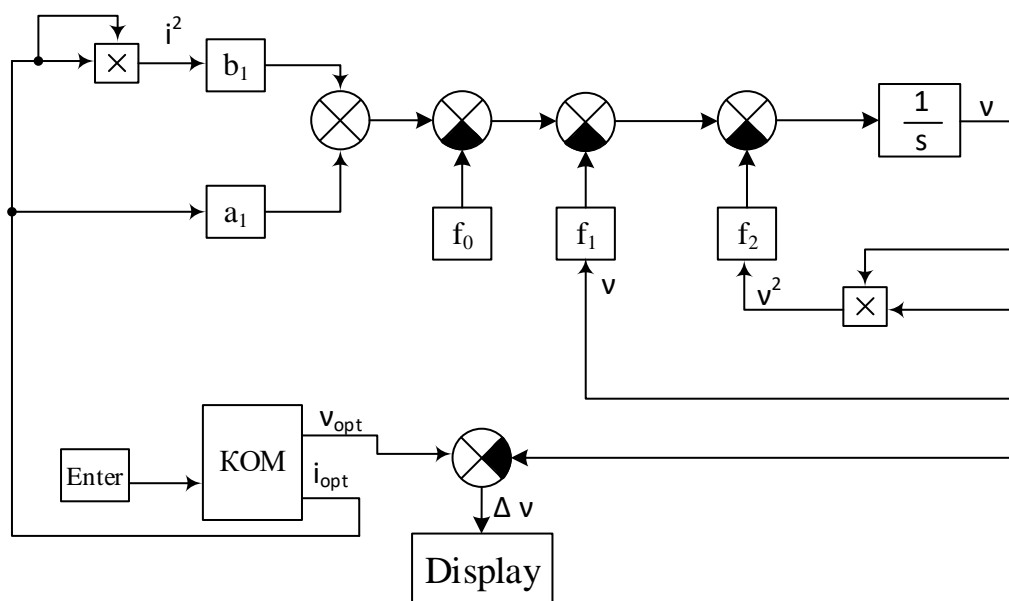


Рисунок 4 – Структура імітаційної моделі для оцінки адекватності моделей оптимального руху по горизонталі завантаженого електромобіля

Користуючись цими імітаційними моделями, кожен розробник моделей оптимального руху для конкретного електромобіля зможе перевірити отримані ним моделі на адекватність.

Також здійснено імітаційне моделювання процесів зміни струму якоря тягового електродвигуна та швидкості руху електромобіля, оптимальних за критерієм мінімуму витрат електроенергії акумуляторної батареї, з метою оцінки адекватності синтезованих моделей

## ВИСНОВКИ

На основі проведення даного дисертаційного дослідження, присвяченого розробленню математичних моделей руху електромобіля з електроприводом постійного струму з послідовним збудженням, оптимальних за критерієм мінімуму витрат електричної енергії, а також присвяченого розробці математичних моделей оптимізації руху гібридного електромобіля, оснащеного окрім системи електропривода ще й додатковим двигуном внутрішнього згорання, оптимальних за критерієм мінімуму витрат як електричної енергії так і пального, отримані нові наукові результати, які в сукупності розв'язують важливу науково-прикладну задачу. На основі аналізу результатів дослідження можна зробити наступні висновки:

Уже в найближчі 5-10 років електромобілі складуть серйозну конкуренцію автомобілям з двигунами внутрішнього згорання. При цьому компанії, які

виробляють електромобілі, з метою отримання переваг у конкурентній боротьбі і далі не намагатимуться широко оприлюднювати свої технічні рішення. А тому українським вченим для того, щоб допомогти вітчизняним електромобілебудівникам, доведеться самостійно створювати математичні моделі процесів, що мають місце в електротехнічних системах електромобілів, і технічні рішення по їх впровадженню.

Починати розробляти теорію по оптимізації руху електромобілів потрібно зі створення моделей процесів, що протікають в електротехнічних системах електромобілів, тягове зусилля в яких створюється системами електроприводів з електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, оскільки саме така теорія матиме прикладне значення уже сьогодні, адже на усіх тролейбусах тягу створюють саме електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, а тролейбуси в класі електромобілів уже сьогодні мають широке застосування з тенденцією реконструювання частини їх в електробуси, в яких енергія в систему електропривода надходить не з контактної електромережі через тролєї, а від акумуляторів. Крім того, як стверджують іноземні фахівці, невдовзі повинна розпочатись ера переходу на електричну тягу і вантажних автомобілів та автобусів, для яких електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням в силу «мякості» їх тягових характеристик та відсутності потреби в потужних, а тому габаритних, конденсаторних батареях для створення електромагнітного поля в зазорі тягових асинхронних двигунів, що знайшли застосування в легкових електромобілях, матимуть значну перевагу в застосуванні.

В дисертації вперше синтезовані моделі оптимального руху електромобіля з тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням за критерієм мінімуму витрат енергії силової акумуляторної батареї під час руху дорогою, яка має горизонтальні ділянки, спуски та підйоми, які внесуть суттєвий вклад в теорію оптимізації електротехнічних комплексів транспортних засобів.

Вперше здійснено синтез закону та системи керування оптимальним рухом електромобіля, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, що дозволяє за будь якої швидкості автомобіля сформувавши такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії силової акумуляторної батареї, вносить суттєвий вклад і в практику оптимізації електротехнічних комплексів транспортних засобів.

На новому рівні узагальнення в дисертаційній роботі здійснено декомпозицію задачі оптимізації руху електромобіля, електротехнічна тягова установка якого доповнена двигуном внутрішнього згорання, що переводить її в клас гібридних, за умови, що гібридний електромобіль рухається дорогою, яка крім горизонтальних ділянок містить спуски та підйоми, чим охоплюються

всі можливі випадки організації руху гібридного електромобіля за оптимальними законами.

Запропонований обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданий час гібридного електромобіля з непрацюючою системою електропривода та його модифікація для випадку, коли досягнувши вказаного кінцевого пункту, гібридний електромобіль продовжує рух, що дозволяє визначати чисельні значення параметрів та змінних моделей оптимального руху за короткі проміжки часу, розширює область застосування отриманих у дисертаційній роботі результатів за межі поставлених у ній задач

Розроблена в дисертації методика імітаційного моделювання з використанням запропонованих структур імітаційних моделей, стане тим знаряддям, за допомогою якого кожен, хто розв'язуватиме задачу синтезу моделей оптимального руху конкретного типу електромобіля, зможе перевірити синтезовані математичні моделі оптимального руху на адекватність.

Важливим є те, що розроблені методи та система оптимального керування електромобілем, що рухається як без перешкод горизонтальною ділянкою дороги або на спуск чи підйом, так і у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, дозволяють при будь-якій швидкості електромобіля сформувати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії акумуляторної батареї. А в разі доповнення електротехнічної тягової установки електромобіля двигуном внутрішнього згорання ці методи і система керування дозволяють забезпечити такі режими руху цього гібридного електромобіля, які не лише мінімізують витрати енергії силового акумулятора, але мінімізують і витрати пального для двигуна внутрішнього згорання.

В дисертаційній роботі встановлено також, що математичні моделі руху електромобіля, оснащеного тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, оптимальні за критерієм мінімуму витрат енергії силової акумуляторної батареї, є справедливими і для такого класу електромобілів, яким є тролейбуси, тяговими електродвигунами яких теж є електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, з тією лише різницею, що при реалізації цих моделей оптимального руху досягається не мінімум витрат енергії силової акумуляторної батареї, а мінімум витрат енергії, яку споживає електропривод тролейбуса з контактної електричної мережі.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Мокін О.Б. Оптимізація руху завантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / Мокін О.Б., Фолюшняк

О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 56 - 60.

2. Мокін О.Б. Оптимізація руху незавантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / Мокін О.Б., Фолюшняк О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 48 -51.

3. Мокін О.Б. Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі / Мокін О.Б., Фолюшняк О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 107-110.

4. Мокін О.Б. Синтез закону керування оптимальним рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі [Електронний ресурс] / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Фолюшняк О.Д., Лобатюк В.А. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – № 1. – С. 1-7. – Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/392/390>

5. Мокін О.Б. Декомпозиція задачі оптимізації руху транспортного засобу з комбінованим приводом системи [Електронний ресурс] / Мокін О. Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А., Кубрак О.П. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2015. – №3. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/9/9>

6. Мокін О.Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Б., Лобатюк В.А., Кубрак О.П. [Електронний ресурс] // «Наукові праці Вінницького національного технічного університету». – 2015. – №4. – Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/453/451>

7. Мокін О.Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючим двигуном внутрішнього згорання / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А., Кубрак О.П. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 5. – С. 69 - 77.

8. Мокін О. Б. Обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданий час гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода / Мокін О. Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №6. – С. 43-51.

9. Мокін О.Б. Модифікація методу ідентифікації моделей оптимального руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода для випадку, коли, досягнувши кінцевого пункту, автомобіль продовжує рух / Мокін О.Б., Мокін Б.І. Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 1. – С. 65-73.

10. Мокін О.Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з одночасно працюючими на спільний вал двигуном внутрішнього згорання та системою електропривода / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 33 - 37.

11. Мокін О.Б. Метод та система оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці/ Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А., // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 41 - 46.

12. Mokin, O. Mokin, V. Lobatyuk, V. Sagymbekova, A. Zyska, T. Burlibay, A. Orshubekov, N. The synthesis of optimum current obtained by mathematical models for an electrically propelled truck drive electromotor | [Synteza optymalnego prądu silnika elektrycznego wózka pojazdu ciężarowego za pomocą modeli matematycznych] DOI:10.15199/48.2017.03.18

13. Мокін О.Б. Моделі оптимального руху гібридного автомобіля у фазі створення тяги лише електроприводом / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. [Електронний ресурс] // XLV Науково-технічна конференція Вінницького національного технічного університету (2016). Секція відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів Електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2016/paper/view/397/204>

14. Мокін О.Б. Декомпозиція задачі оптимального руху гібридного автомобіля / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. [Електронний ресурс] // XLV Науково-технічна конференція Вінницького національного технічного університету (2016). Секція відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів Електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 2016.– Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2016/paper/view/396/203>

15. Мокін О.Б. Система оптимального руху керування електромобілем, що рухається у транспортному потоці / Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016). XIII Міжнародна конференція. Тези доповідей Вінниця. 3-6 жовтня 2016 року. – Вінниця: ВНТУ. ПП «ПП. «Едельвейс», 2016.- С. 150-152

## АНОТАЦІЯ

**Лобатюк В.А.** Оптимізація режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля з електроприводом постійного струму. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля з тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням за критерієм мінімуму витрат енергії акумуляторної батареї з метою збільшення запасів ходу електромобіля від одного заряду акумуляторної батареї.

Синтезовані математичні моделі оптимального руху горизонтальним відрізком дороги, на спуск та на підйом як нормально завантаженого, так і недозавантаженого електромобіля. Розроблено метод ідентифікації цих

математичних моделей та обчислювальний метод його реалізації. Розв'язана обернена задача, в результаті якої стає можливим формування оптимального струму в якорі тягового електродвигуна за будь-якої швидкості електромобіля, обумовленої їздою в міських транспортних потоках та обмеженнями, створеними знаками дорожнього руху. Розроблена система керування електротехнічним комплексом електромобіля, придатна для реалізації законів оптимального руху як шляхом створення такого струму якоря тягового електродвигуна, який забезпечує оптимальну швидкість електромобіля, так і шляхом створення оптимального струму якоря за будь-якої швидкості електромобіля. Запропоновані базові моделі динаміки гібридного електромобіля, тягова установка якого окрім системи електропривода містить в собі ще й двигун внутрішнього згорання, який може бути виключеним, може працювати на спільний вал разом з системою електропривода, або може створювати тягове зусилля самостійно в разі відключення з якоїсь причини системи електропривода. Синтезовані математичні моделі оптимального за критерієм мінімуму витрат електроенергії та пального руху гібридного електромобіля з тягою лише від двигуна внутрішнього згорання та з тягою, створюваною одночасно двигуном внутрішнього згорання і системою електропривода, працюючими на спільний вал. Запропонована методика та структури імітаційних моделей для перевірки адекватності синтезованих математичних моделей оптимального руху як класичного електромобіля, так і гібридного.

Ключові слова: електромобіль, система електропривода, електродвигун постійного струму з послідовним збудженням, гібридний електромобіль, двигун внутрішнього згорання, критерій мінімуму витрат енергії, моделі оптимального руху, система оптимального керування.

## ABSTRACT

**Lobatiuk V.** Optimization of work modes of electrotechnical complex consisting of a battery-driven vehicle with DC electric drive. – A manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Vinnytsya national technical university. – Vinnytsya, 2017.

Thesis is dedicated to optimization of work modes of electrotechnical complex consisting of a battery-driven vehicle with direct current traction motor of series excitation as for the criterion of minimum electric energy consumption of the storage battery in order to increase the battery-driven vehicle power reserve from a single storage battery charge.

Mathematical models of optimal motion of normally loaded and underloaded battery-driven vehicle on the horizontal section, uphill and downhill were synthesized. A method of identification of these models and computational method for its implementation has been developed. Inverse problem has been solved which provided an opportunity to produce an optimal current in the traction motor anchor at any vehicle speed determined by drive in the city traffic and limitations caused by

road signs. Vehicle electrotechnical complex control system able to implement laws of optimal motion both by creating such current in the traction motor anchor that would ensure optimal speed of the battery-driven vehicle and by creating optimal anchor current at any speed of the battery-driven vehicle has been developed. Basic models of dynamics of a battery-driven vehicle whose traction system besides of electric drive system also has an internal combustion engine which can be turned off, work on a common axle with electric drive system or create tractive effort on its own in case of electric drive system turnoff have been proposed. Mathematical models of optimal motion of a battery-driven vehicle with traction only from internal combustion engine and traction created simultaneously by internal combustion engine and electric drive system working on a common axle as for the criterion of minimum electric energy and fuel consumption have been synthesized. Methods and simulation model structures for checking the adequacy of synthesized mathematical models of optimal motion of both classic and hybrid battery-driven vehicle have been proposed,

Keywords: Electric vehicle, electric drive system, direct current traction motor of series excitation, hybrid battery-driven vehicle, internal combustion engine, criterion of minimum electric energy consumption, optimal motion models, optimal driving system.

## АННОТАЦИЯ

**Лобатюк В.А.** Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса электромобиля с электроприводом постоянного тока. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2017.

Диссертационная работа посвящена оптимизации режимов работы электротехнического комплекса электромобиля с тяговыми электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением по критерию минимума использования энергии аккумуляторной батареи с целью увеличения запасов хода электромобиля от одного заряда аккумуляторной батареи.

В данном диссертационном исследовании предложено начать создание теории оптимизации режимов работы электротехнических комплексов электромобилей с разработки оптимальных моделей процессов, которые протекают в электромобилях, тяговое усилие в которых создается системами электроприводов с электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, поскольку именно такая теория будет иметь прикладное значение уже сегодня, в силу того, что во всех троллейбусах тяговое усилие создают именно электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, а троллейбусы в классе электромобилей уже сегодня имеют широкое применение с тенденцией реконструирования части их в электробусы, в которых энергия в систему электропривода поступает не из контактной электросети через троллеи, а из аккумуляторов. Кроме того, как утверждают

иностранные специалисты, вскоре должна начаться эра перехода на электрическую тягу и грузовых автомобилей и автобусов, для которых электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением в силу «мягкости» их тяговых характеристик и отсутствия потребности в мощных, а посему габаритных, конденсаторных батареях для создания электромагнитного поля в зазоре тяговых асинхронных электродвигателей, которые нашли применение в легковых автомобилях, будут иметь значительное преимущество.

Вот почему синтезированные в диссертации модели оптимального движения электромобиля с тяговыми электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением по критерию минимума расхода энергии силовой аккумуляторной батареи во время движения по дороге, которая имеет горизонтальные участки, спуски и подъемы, внесут существенный вклад в теорию оптимизации электротехнических комплексов транспортных средств. А синтез закона и системы управления оптимальным движением электромобиля, который движется в городском транспортном потоке с переменной скоростью, обусловленной знаками светофоров и влиянием транспортных средств, движущихся впереди, что позволяет при любой скорости электромобиля сформировать такой ток в якоре тягового электродвигателя с последовательным возбуждением, который минимизирует расход энергии силовой аккумуляторной батареи, вносит существенный вклад и в практику оптимизации электротехнических комплексов транспортных средств.

На новом уровне обобщения в диссертационной работе осуществлена декомпозиция задачи оптимизации движения электромобиля, электротехническая тяговая установка которого дополнена двигателем внутреннего сгорания, который переводит электромобиль в класс гибридных транспортных средств, для которых в диссертации получены оптимальные законы движения и горизонтальными участками дороги, и на спуск, и на подъем, и с грузом, и без груза.

Для идентификации синтезированных моделей оптимального движения электромобиля как классического, так и гибридного, в том числе и от остановки до остановки за заданное время, а также в случае проезда мимо конечного пункта без остановки, предложен вычислительный метод, алгоритм которого позволяет определять численные значения параметров моделей оптимального движения, в том числе и за короткие промежутки времени, что очень важно при движении в городских транспортных потоках.

Внесен определенный вклад в диссертации и в методику иммитационного моделирования за счет внесения таких структур иммитационных моделей, которые позволяют осуществить оценку синтезированных математических моделей оптимального движения на адекватность.

В диссертационной работе показано также и то, что математические модели движения электромобиля, оснащенного тяговыми электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, оптимальные по критерию минимума расхода энергии силовой аккумуляторной батареи, являются справедливыми и для такого класса электромобилей, каким есть троллейбусы, тяговыми электродвигателями которых также есть



электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, с той лишь разницей, что при реализации этих моделей оптимального движения достигается не минимум расхода энергии силовой аккумуляторной батареи, а минимум расхода энергии, которую потребляет электропривод троллейбуса с контактной электросети.

Ключевые слова: электромобиль, система электропривода, электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, гибридный электромобиль, двигатель внутреннего сгорания, критерий минимума расхода энергии, модели оптимального движения, система оптимального управления.

Підписано до друку 25. 09. 2017 р. Формат 29.7×42¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2017 – 357.

Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:59-87-38

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р