

Ю. Л. Крайник¹, О. І. Гула²¹ВАТ “Укравтобуспром”,²Нац. ун-т “Львівська політехніка”,

кафедра автомобілебудування

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ ЦИКЛІЧНОГО РУХУ МІСЬКОГО АВТОБУСА З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДУ

© Крайник Ю. Л., Гула О. І., 2015

Наведено алгоритм комп’ютерного моделювання циклічного руху міського автобуса з класичним (дизель – гідромеханічна чи механічна трансмісія), гібридним (послідовного типу) та електроприводом.

Ключові слова: міський автобус, гібридний привід, електричний привід, комп’ютерне моделювання, алгоритм.

An algorithm for computer simulation of the cyclic motion of a city bus with traditional (diesel - hydromechanical or mechanical transmission), hybrid (serial type) and electric drive.

Key words: city bus, hybrid (serial type) and electric drive, computer simulation, algorithm.

Постановка проблеми. Тенденція впровадження альтернативних типів силового приводу на сучасних міських автобусах рівно як і параметрична оптимізація класичного приводу з дизельним чи газовим двигуном обумовлюють необхідність розробки деталізованої програми комп’ютерного розрахунку – моделювання руху міського автобуса в характерних циклічних умовах руху. При цьому необхідно враховувати статистичні дані – ймовірнісний розподіл довжин та кінцевих швидкостей циклічного руху, інтенсивність розгону та сповільнення (гальмування), розподіл окремих фаз руху в циклі.

Аналіз відомих досліджень. Збільшення операційних можливостей та програмного забезпечення сучасної комп’ютерної техніки дозволяє сформувати змішаний детерміновано-стохастичний алгоритм розрахунку-моделювання циклічного руху автобуса практично у всій зоні навантажень двигуна (незалежно від типу) як детермінованої моделі з подальшим узагальненням отриманих результатів детермінованих циклів руху через ймовірнісні фільтри – гістограми розподілу кінцевих швидкостей розгону – квазіусталеного руху (v_y), довжини циклів руху ($S_{ц}(P)$), маси (завантаження) автобуса ($G_a(P)$) та інтенсивності розгону (гальмування). Це дозволяє також промоделювати рух автобуса стосовно так званих типових умов їздових тестів. Сучасні відомі дослідження [1–3] практично є алгоритмами детермінованого типу. Окрім того, фактично не визначались характеристики енерговитрат – енергобалансу у циклі та окремих фазах руху, що є особливо актуальним і визначальним для автобусів з альтернативними приводами.

Постановка задачі. Мета роботи – формування алгоритму програми комп’ютерного моделювання циклічного руху міських автобусів з врахування роботи різних типів силового приводу на режимах часткових навантажень та ймовірнісного розподілу фаз і режимів руху в реальній експлуатації, розрахунок енергобалансу на вищезазначених режимах руху.

Основний матеріал. В основу опрацьованого алгоритму – програми комп’ютерного моделювання циклічного руху міського автобуса методом чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь опису динаміки та енергетики руху покладено розвиток структури

алгоритму розрахунку руху міських автобусів [4] та такі особливості – підпрограми (зокрема чисельної інтерполяції і пакета Matlab/Simulink):

- задання у вигляді двовимірних цифрових масивів нелінійних характеристик тягового двигуна (дизельного чи електричного) у всьому діапазоні навантажень (фіксоване положення педалі акселератора у водія) і по тягових ($M_e(n_e)$), і по енергетичних ($g_e(n_e)$, $E_{\text{пит}}(n_e)$) характеристиках з подальшим визначенням тягових та енергетичних значень роботи двигуна під час кожного кроку чисельного інтегрування рівнянь руху підпрограмою двовимірного інтерполювання заданих двовимірних цифрових масивів характеристик двигуна;

- нелінійна безрозмірна характеристика гідротрансформатора (у випадку автобуса з гідромеханічною передачею) також задається у вигляді масиву цифрових даних коефіцієнта навантаження $\lambda_1(i)$ та коефіцієнта трансформації $k(i)$ у функції співвідношення частот обертання турбінного n_t та насосного n_n коліс з подальшим інтерполюванням поточних значень параметрів $\lambda_1(i)$ та $k(i)$ у підпрограмі розрахунку динаміки взаємодії системи “двигун-гідротрансформатор”;

- окрема підпрограма розрахунку рекуперації кінетичної енергії автобуса з гібридним або електроприводом під час фази сповільнення з врахуванням характеристики та ККД переходу тягового електродвигуна у режим генерування електроенергії.

Алгоритм детермінованого розрахунку базується на послідовному переборі всіх заданих можливих варіантів – комбінацій фаз циклічного руху (з обмеженням відповідно заданих довжин циклу руху $S_{\text{ц}}$) при фіксованому положенні педалі акселератора водія відповідно до заданого двовимірного масиву даних.

Моделювання сповільнення розбито на декілька фаз залежно від швидкості руху, що виключають сповільнення – службове гальмування двигуном (чи ретардером ГМП) різної інтенсивності (залежно від діапазону швидкості руху) та використання робочої гальмівної системи автобуса у разі досягнення критичної (типової в експлуатації) швидкості руху до повної зупинки автобуса. Такий підхід є характерним і під час формування наявних у різних країнах типових їздових тестів (сукупності циклів) міських автобусів, зокрема при дослідженнях щодо параметричної оптимізації альтернативних приводів [6–8].

Сформована таким способом програма комп’ютерного моделювання циклічного руху міського автобуса дозволяє не тільки оцінити ще на проектній стадії лінійні витрати палива нової моделі автобуса в типових або конкретних (заданих гістограмою ймовірнісного розподілу швидкостей руху та довжин циклу) умовах, що дозволяє провести параметричну оптимізацію різних типів силового приводу з умов енергоефективності, зокрема:

- визначити оптимальні значення (діапазон) потужності та тягового (крутного) моменту тягового двигуна (і дизельного, і електричного) з умов мінімізації енергозатрат (лінійної витрати палива л/100км для дизельного приводу, кВт·год/100км для електричного) за забезпечення необхідних швидкісних режимів, динаміки розгону в типових (чи інших заданих) умовах руху для конкретних моделей автобусів різних габаритно-вагових категорій;

- сформував необхідний діапазон передатних чисел трансмісії у варіанті з дизельним двигуном включно з вибором передатного числа головної передачі (ведучого моста) у поєднанні з передатним діапазоном коробки передач (гідромеханічної чи механічної), що працюють у єдиному комплексі трансформації силового потоку від двигуна до ведучих коліс. У варіанті з електроприводом (включно гібридний послідовної схеми) – оптимізувати передатне число головної передачі під конкретну модель тягового електродвигуна;

- на базі енергобалансу руху оптимізувати необхідну потужність дизель-генераторної станції і ємність енергонакопичувачів (літій-іонних акумуляторів, суперконденсаторів чи їхнього поєднання), що дозволяє мінімізувати собівартість виготовлення автобуса за забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик для варіанта з гібридним приводом;

- для електробусів – визначити реальний запас ходу в типових (чи конкретних) умовах руху за заданої ємності енергонакопичувачів або ж, навпаки, визначити необхідну (раціональну) ємність енергонакопичувачів для забезпечення заданого регламентованого запасу ходу.

Природно, що на відміну від схеми з класичним дизельним приводом варіанти з електроприводом потребують низки малодосліджених в автобусобудуванні задач, зокрема слід виділити дві найактуальніші проблеми:

- характеристика питомого енергоспоживання тягових електродвигунів у всьому діапазоні режимів часткових навантажень (заводи-виробники тягових електродвигунів, як правило, обмежуються наданням зовнішньої швидкісної характеристики та відповідного енергоспоживання двигуна);

- характеристика роботи силового електродвигуна в режимі рекуперації, втрат енергії при трансформації через силовий блок управління (регулювання) системи електродвигун-енергонакопичувач (насамперед стосовно суперконденсаторів).

Загальна структура опрацьованого так алгоритму комп'ютерного моделювання циклічного руху міських автобусів з різними типами приводу наведена на рис. 1.

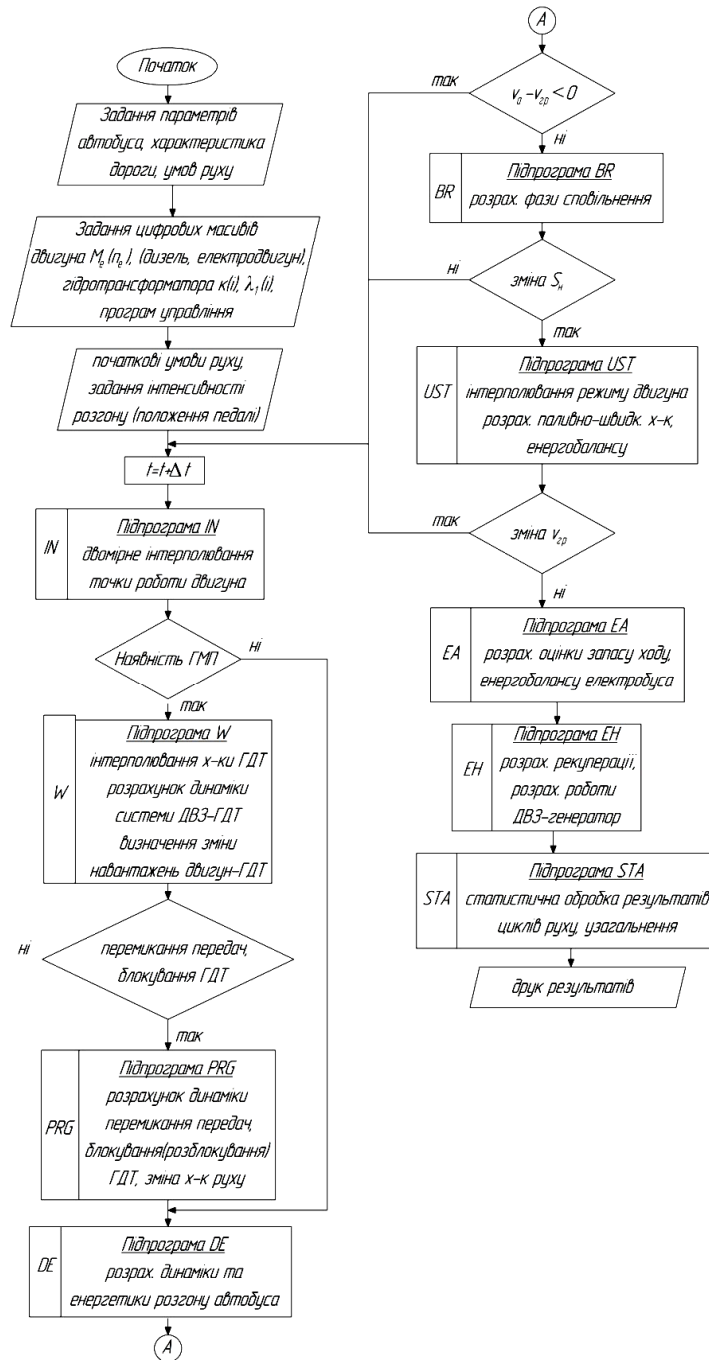


Рис. 1. Структура підпрограм алгоритму моделювання циклічного руху міського автобуса

Важливою, насамперед, для систем гібридного та електроприводу є оцінка енерговитрат на привід допоміжних систем та агрегатів, характерних для кожного з масогабаритних класів сучасних міських автобусів. Це стосується електроприводів компресора пневмосистеми гальм, підвіски (у варіанті з пневматичною), пневмоприводу службових (пасажирських) дверей, а також насоса гідропідсилювача кермового приводу та систем забезпечення мікроклімату в салоні (обігрівання салону та життєвоважливий з умов безпеки руху обдув гарячим повітрям лобового скла автобуса у холодну пору року, електропідігрівання дзеркал зовнішнього огляду), забезпечення роботи світлотехніки у темні години доби. Зрештою ці показники є добре відомими для автобусів з класичним дизельним приводом і квантифікації цих додаткових витрат потужності/енергоспоживання не становить якихось труднощів під час розрахунку енергобалансу руху машин з нестандартним приводом.

У сучасному автобусобудуванні відсутні якісь певні законодавчі нормативні вимоги щодо регламентації динаміки розгону міських автобусів з номінальним завантаженням (зокрема з умов вписування у транспортний потік). Звичні в ЄСРП рекомендації щодо вписування часу розгону у 30 с для досягнення 50 км/год (чи 37 с до 60 км/год) при існуючих типових значеннях питомої потужності сучасних автобусів виконуються зі значним запасом. Однак можна констатувати, що і надмірне підвищення, і зниження питомої потужності істотно впливає або на собівартість виробництва, або ж на навантажувально-ресурсні показники роботи силового приводу (при тому нижній діапазон питомої потужності обмежується умовами забезпечення типової інтенсивності розгону при середньостатистичному завантаженні згідно з [6]).

Очевидно також, що надмірні (з типових умов руху) значення питомої потужності тягових двигунів супроводжуються і погіршенням енергоефективності руху (збільшення лінійних витрат палива для дизельного приводу, зменшення економії дизпалива гібридного приводу у відношенні до дизельного, зменшення запасу ходу автономного електроприводу).

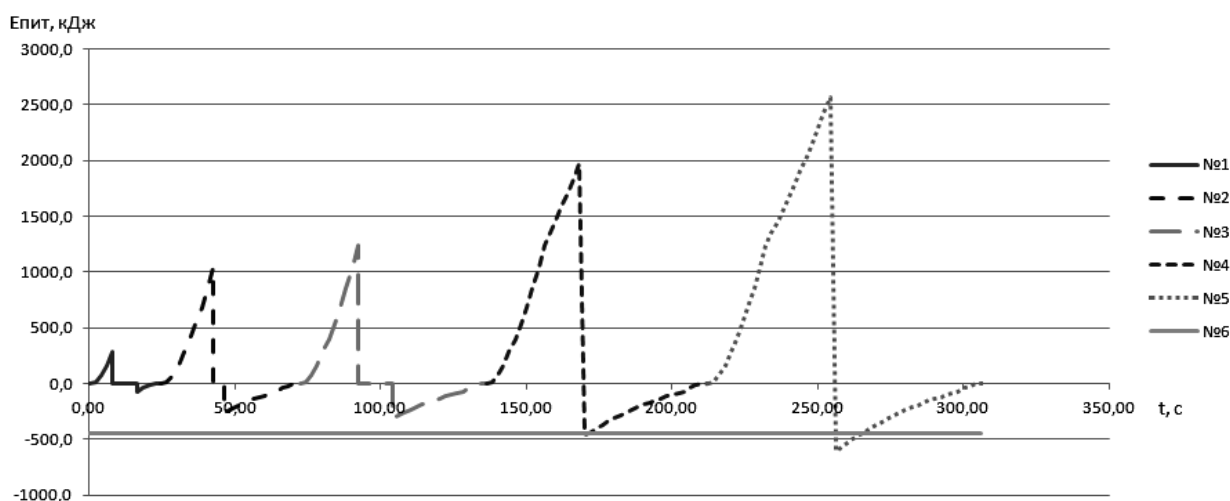


Рис. 2. Приклад частини енергобалансу великого міського автобуса (12 м, 18 т) для п'яти характерних циклів руху типового їздового тесту

Як приклад на рис. 2 наведено результати розрахунку енергобалансу великого міського автобуса (12 м, 18 т) для п'яти характерних циклів руху типового їздового тесту [6] – для варіанта з гібридним рекуперативним приводом. Поповнення заряду накопичувача енергії дизель-генератором виділено лінією 6. Очевидно, що для варіанта автономного електроприводу дане накопичення відсутнє, а при однаковій потужності – характеристиках тягового електродвигуна характер енергоспоживання (лінія 1, рис.2) для обох типів приводу залишається незмінним.

Власне типові умови – типовий їздовий тест дозволяє раціонально вибрати необхідну потужність і тягового електродвигуна, і дизель-генератора та необхідної ємності енергонакопичувачів для гібридного силового приводу. У випадку з автономним електроприводом –

визначити реальний запас ходу до необхідного підзарядження при заданій ємності енергонакопичувачів або ж, навпаки, визначити необхідну ємність енергонакопичувачів для забезпечення заданого запасу ходу. Аналогічно і для дизельного приводу – визначення оптимального рівня потужності (тягових характеристик) двигуна та передатних чисел коробки передач (як правило з існуючих варіантів заводів-виробників) та головної передачі з умов мінімізації лінійної витрати палива при забезпеченні заданих (регламентованих) динамічних характеристик руху.

Висновки. Опрацьований так алгоритм моделювання динаміки та енергетики циклічного руху міських автобусів дозволяє здійснити і підбір характеристик приводу – параметричної оптимізації з умов енергоефективності, і отримати кількісну оцінку ефективності конкретного типу приводу і автобуса, загалом. Це створює теоретичні засади формування і концепції конкретного типу силового приводу загалом, і отримати кількісну оцінку ефективності у співвідношенні витрати – енергоефективність.

1. Yajuan Yang. *Drive Train Design and Modeling of a Parallel Diesel Hybrid Electric Bus Based on AVL/Cruise/ Han Zhao, Hao Jiang // World Electric Vehicle Journal Vol. 4 - ISSN 2032-6653 - 2010 WEVA. – P.75.* 2. Thierry Coosemans. *Optimization of Propulsion Systems for Series-Hybrid City Busses through Experimental Analysis/ Ricardo Barrero, Jean-Marc Timmermans, Joeri Van Mierlo // World Electric Vehicle Journal Vol. 4 - ISSN 2032-6653 - 2010 WEVA. – P.184.* 3. Гутаревич Ю. Ф. *Перевірка адекватності математичної моделі руху дорожнього транспортного засобу за їздовим циклом при роботі на природному газі/ Матейчик В. П., Сидоренко Р. В., Яновський В. В. // Вісник НТУ і ТАУ №6. – К.: НТУ, ТАУ. – 2002. – С.300–304.* 4. Крайник Л. В. *Алгоритм моделювання руху автобусів у типових їздових циклах та особливості розрахунку лінійної витрати палива/ Бондар М. Ф. // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів” №107, Львів, 2011. – С.38–42.* 5. ГОСТ 20306-90. *Автотранспортные средства. Топливная экономичность. – М.: Госстандарт, 1990.* 6. Крайник Ю. Л. *Типовість експлуатаційних режимів міських автобусів і формування їздового циклу // Автотехніка. Автобуси, вантажівки. – 2007. – №1. – С.50–52.* 7. Braun H. *Ein Standard – Fahrzyklus fur Stadt – Linienomnibusse: Stadtbus-Zyklus/ Dreyer W. // ATZ 81-1979-n.1, S.29-32.* 8. Liangfei Xu. *Influence of powertrain parameters on vehicle performance of a fuel cell / battery city bus/ Minggao Ouyang, Jianqiu Li, Jianfeng Hua // World Electric Vehicle Journal Vol. 4 - ISSN 2032-6653 - 2010 WEVA. – P.143.*