Предложенный способ определения параметров НЭ для тягового асинхронного привода с ограничением тока тяговой сети может быть использован как для определения параметров накопителя энергии для его применения при модернизации существующих асинхронных тяговых приводов, так и с целью определения оптимальных параметров НЭ и асинхронного тягового привода для новых разработок.

Выводы. В статье рассмотрено использование асинхронного тягового привода с накопителем энергии для ограничения тока тяговой сети и предложен способ определения его параметров. Изложенный подход к определению параметров накопителя энергии может быть использован для других случаев его применения.

Список литературы: 1. *Омельяненко В.И.*, *Бондаренко В.Е.*, *Омельяненко Г.В.*, *Оверьянова Л.В.* Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт. – 2011. – №4. – С. 4 – 9. **2.** *Спиридонов Е.А.* Применение накопителей энергии для выравнивания нагрузок в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – С. 258 – 262. **3.** Экономия энергии на рельсовом транспорте Японии // Железные дороги мира – 2013. – №8. – С. 47 – 53. **4.** Перспективы рынка дизельного подвижного состава в Европе // Железные дороги мира – 2012. – №1. – С. 38 – 42. **5.** *Осипов С.И.* Теория электрической тяги [Текст]: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов ; под. ред. С.И. Осипова – М.: Маршрут, – 2006.

Bibliography (transliterated): 1. Omel'janenko, V. I., et al. "Nakopiteli energii – perspektivnaja tehnologija dlja zheleznyh dorog." *Mizhnarodnyj informacijnyj naukovo-tehnichnyj zhurrnal «Lokomotiv-inform»*. No. 4. 2011. Kharkiv: Tehnostandart. 4–9. Print. **2.** Spiridonov, E. A. "Primenenie nakopitelej energii dlja vyravnivanija nagruzok v sisteme elektrosnabzhenija gorodskogo elektricheskogo transporta." *Nauch. problemy transp. Sibiri i Dalnego Vostoka*. No. 1. 2008. 258–262. Print. **3.** "Ekonomija energii na rel'sovom transporte Japonii." *Zheleznye dorogi mira.* No. 8. 2013. 47–53. Print. **4.** "Perspektivy rynka dizel'nogo podvizhnogo sostava v Evrope." *Zheleznye dorogi mira*. No. 1. 2012. 38–42. Print. **5.** Osipov, S. I., S. S. Osipov and V. P. Feoktistov. *Teorija elektricheskoj tjagi. Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta*. Ed. S. I. Osipov. Moscow: Marshrut, 2006. Print.

Поступила (received) 02.03.2015

УДК 629.113+629.331

В.П. САХНО, д-р техн. наук, проф., НТУ, Київ;
В.М. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ, Київ;
О.М. ТІМКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ, Київ;
О.С. ІВАНОВ, аспірант, НТУ, Київ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТІВ ГСУ ТА РЕЖИМІВ ЇХ РОБОТИ ДЛЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© В. П. Сахно, В. М. Поляков, О. М. Тімков, О. С. Іванов, 2015

Розроблена методика, яка дозволяє встановити влив розподілу потужності між агрегатами гібридної силової установки (ГСУ), алгоритму керування та експлуатаційного маршруту руху на показники тягово-швидкісних властивостей і паливної економічності вантажних автомобілів. В якості оціночних критеріїв виступають показники тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності та витрати електричної енергії автомобілем із ГСУ. Використаний ймовірнісний підхід до вибору раціональної величини потужності ГСУ, її розподілу між електродвигуном (ЕД) і двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) та вибору режимів їх спільної роботи.

Ключові слова: автомобіль, алгоритм, потужність, електродвигун, тягово-швидкісні властивості, паливна економічність, енергія, маршрут руху, швидкість.

Вступ. В Україні питанням створення автомобіля з гібридними силовими установками (ГСУ) займаються *О.В. Бажинов*, *О.П. Смирнов*, *С.А. Серіков*, *О.М. Тімков* та інші вчені. Питання доцільності створення автомобілів з ГСУ розглянуто в роботах *А.В. Дубинена*, *А.А. Бикова*, *М.Г. Колобова*, *Н.О. Грищенко*, *П.М. Киркина*, *В.Х. Далека*, *В.Ф. Харченко*, *М.І. Шпіка* [1 – 10]. В роботах [3 – 6] автори основними причинами впровадження транспортних засобів (ТЗ) з ГСУ називають забруднення навколишнього середовища, надмірне споживання не відновлюваних природних ресурсів (нафта та газ) автомобільним транспортом. Автори відзначають, що впровадження автомобіля з ГСУ значно покращить екологічні та економічні показники ТЗ.

У роботі [6] наведено обґрунтування необхідності створення ТЗ для міських пасажирських перевезень з гібридною силовою установкою. Автори відзначають, що об'єднання позитивних якостей ДВЗ та тягового електроприводу на транспортному засобі дозволяє отримати переваги в порівнянні з традиційною конструкцією за рахунок підвищення екологічної чистоти, економії палива, поліпшення динамічних властивостей та підвищення ККД енергоустановки.

Аналіз останніх досліджень. Широке коло задач із дослідження систем керування ГСУ розглянуто *С.А. Серіковим* [7, 8 та ін.]. Він розглянув особливості послідовно-паралельної схеми ГСУ і трансмісії автомобіля з ГСУ як об'єкту керування за швидкістю руху. Була отримана математична модель силової установки для автомобілів з ГСУ з послідовно-паралельною схемою. Отримана модель використовується при оптимізації процесу перерозподілу потоків потужності між агрегатами ГСУ на різноманітних тягово-швидкісних режимах. Особливістю роботи [8] є те що, керування ГСУ в даному випадку здійснюється за допомогою наступних керуючих дій: положення органу керування потужністю ДВЗ (ступінь відкриття дросельної заслінки у %); струму оберненої електричної машини; передаточного відношення u трансмісії від ДВЗ до ведучих коліс; коефіцієнту, що враховує повноту вмикання зчеплення.

Висвітлені у відомих джерелах роботи не можна назвати вичерпними в плані постановки задачі щодо визначення параметрів вантажних автомобілів з ГСУ. На жаль, відсутня загальна методологія в моделюванні та проектуванні основних компонентів ГСУ. Алгоритм керування ГСУ та процес оптимізації алгоритму керування з визначенням оптимальних умов переходу між режимами роботи є унікальним у кожного автовиробника та засекреченим. У цій області все ще залишається багато невирішених питань. Вітчизняне автомобілебудування значно відстає у розробці та реалізації цього напрямку. В

зв'язку з цим дослідження в області створення вітчизняного автомобіля з ГСУ є актуальними.

Постановка задачі. Метою дослідження є розробка методики з наступною реалізацією у вигляді комп'ютерної програми, яка дозволяє методом чисельного експерименту встановити вплив розподілу потужності між агрегатами ГСУ, алгоритму керування та експлуатаційного маршруту руху на показники тягово-швидкісних властивостей і паливної економічності вантажних автомобілів. В якості оціночних критеріїв виступають показники тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності та витрати електричної енергії автомобілем із ГСУ.

Математична модель. Модель автомобіля можливо описати математичними формулами на основі загальних принципів механіки. Моделювання автомобіля з ГСУ ускладнюється тим, що він являє собою складну мехатронну систему, в якій необхідно організовувати сумісну роботу електричних, механічних та теплових агрегатів. При моделюванні автомобіля з ГСУ важливо, щоб моделювання об'єкта керування і алгоритму керування проходило в єдиному середовищі, що дає можливість оптимізувати всю систему в цілому. Для ефективного моделювання важливо зберігати баланс між точністю розрахунку та швидкістю моделювання. На деяких етапах розробки потрібні швидкі ітерації, тобто не дуже точні, для швидкого виконання моделі. Існує декілька підходів до моделювання. Однин з них, це моделювання від енергетичної установки (ЕУ) до приводу ведучих коліс (ПВК) [11]. Такий підхід запозичений з практики розробки електропередач тепловозів та може використовуватися для проектування приводів автомобілів з ГСУ. Принцип моделювання від ЕУ до ПВК показаний схематично на рис. 1.

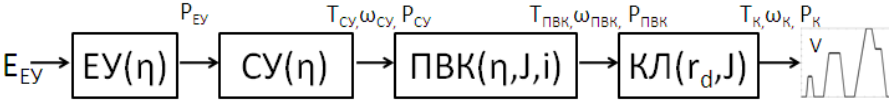

Рис. 1 – Схема моделювання від ЕУ до ПВК.

Задавшись енергією, якою володіє енергетична установка ($E_{EУ}$), враховуючи коефіцієнт корисної дії (ККД), визначається потужність ($P_{EУ}$) яку може надати ЕУ. Далі задавшись ККД силової установки (СУ) та передаточною функцією, що описує залежність між вхідними та вихідними параметрами, визначається потужність, яку надає СУ, а також крутний момент та частота обертання вихідного валу СУ. Потім, задавшись ККД, моментом інерції, передаточним відношенням (i) (або зміною передаточних чисел) ПВК, визначаємо потужність, крутний момент і частоту обертання на валу ПВК. Далі, задавшись динамічним радіусом колеса (КЛ) та моментом інерції колеса, визначаємо швидкість руху транспортного засобу. В деяких випадках, коли неможливо задатися умовами експлуатації автомобіля, а за умовами уніфікації або з інших причин, вибір енергоустановки здійснений, тобто відома потужність ЕУ, що використовується на створення сили тяги, такий підхід є єдино

можливим.

У випадках, коли на початковій стадії проектування відомі експлуатаційні умови, задані у вигляді зміни швидкості руху в часі, на базі відомих залежностей з теорії руху автомобіля можливо обґрунтувати загальні вимоги до електричних, механічних, теплових агрегатів та системи керування силовою установкою автомобіля. Також можливо прогнозувати енергетичні та техніко-економічні показники. Більш раціональним є моделювання за методом від ПВК до ЕУ, показаний схематично на рис. 2.

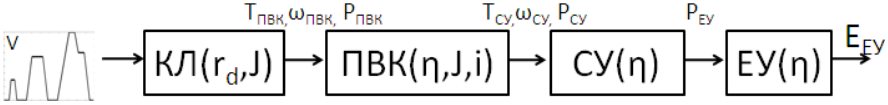

Рис. 2 – Схема моделювання від ПВК до ЕУ.

Задавшись режимом експлуатації, наприклад, у вигляді зміни швидкості автомобіля в часі та динамічним радіусом колеса, можливо визначити потужність, крутний момент та кутову швидкість, що повинні бути створені на валу ПВК для забезпечення заданого режиму експлуатації. В подальшому, задавшись значенням ККД трансмісії, моментом інерції валів, передаточним відношенням (або рядом передаточних відношень) ПВК, – визначається потужність, крутний момент та частота обертання, що повинна створити СУ автомобіля. Далі, прийнявши попередні значення ККД СУ, визначаємо потужність, яку повинна надати ЕУ. Отримане значення потужності ЕУ дозволяє обрати оптимальні параметри розподілу потужності між агрегатами ЕУ для задоволення заданого режиму експлуатації. Такий підхід до проектування автомобілів з ГСУ методологічно більш виправданий. Крім цього, це дозволяє мінімізувати кількість варіантів розрахунків і виключити ряд невизначеностей, які ускладнюють процес проектування.

Розглянемо в роботі саме такий підхід до визначення бажаних характеристик автомобіля при відомих умовах експлуатації. Властивості автомобіля залежать від його здатності набирати швидкість, долати підйоми та зупинятися до певної швидкості за необхідний проміжок часу. В нормальних умовах руху максимальні можливості автомобіля використовуються рідко, протягом тривалого часу силова установка завантажена лише частково. Реальне тягове зусилля і швидкість автомобіля змінюються в широких межах, які визначаються прискоренням, сповільненням, ухилом або підйомом тощо. Ці зміни пов'язані з дорожньою обстановкою та типом автомобіля. Режим рух автомобіля в місті або поза містом також дуже сильно впливає на такі його характеристики, як ступень завантаження. Все це дуже складно впливає на тягове зусилля і зміну швидкості автомобіля в реальних дорожніх умовах. Однак, деякі типові їздові цикли можуть бути використані для моделювання типових дорожніх умов. Ці їздові цикли представляють звичайно у вигляді залежності швидкості автомобіля від часу руху по горизонтальній дорозі. Їздові цикли використовують для оцінки паливної економічності. Переваги гібридного автомобіля краще всього реалізуються при русі у міському циклі з великою кількістю зупинок та гальмувань.

З рівняння динаміки руху автомобіля в поздовжньому напрямку (1), рів-

няння динаміки руху автомобіля в поздовжньому напрямку представляється як:

$$M\delta\frac{dV}{dt}=\left(F_{tf}+F_{tr}\right)-F_w-F_f\pm F_g\sin\alpha\,, \tag{1}$$

де M – маса автомобіля; δ – це коефіцієнт, що враховує обертові маси; dV/dt – лінійне прискорення автомобіля в поздовжньому напрямку руху; F_f – сила опору коченню; F_w – аеродинамічна сила опору; F_g – сила тяжіння від повної маси автомобіля; α – кут нахилу дорожнього покриття; F_{tf}, F_{tr} – тягова сила відповідно на передньої та задньої осях.

Необхідне тягове та гальмівне зусилля, потрібне для виконання режиму експлуатації автомобіля, можна записати у вигляді:

$$F_{tb}=F_f+F_w\pm M\delta\frac{dV}{dt}\pm F_g\sin\alpha\,, \tag{2}$$

де F_{tb} – сила тяги на ведучих колесах.

Це рівняння у випадку ГСУ паралельного типу з приводом на різні осі складається з потрібного тягового та гальмівного зусилля на передній та задній осях автомобіля відповідно:

$$F_{tb}=F_{tb_f}+F_{tb_r}\,. \tag{3}$$

Підставивши складові сили опору в (2) отримаємо:

$$F_{tb}=Mgf_r cos\alpha+\frac{1}{2}\rho A_f C_D V^2\pm M\delta\frac{dV}{dt}\pm F_g\sin\alpha\,. \tag{4}$$

Прискорення автомобіля dV/dt розраховується ітераційним методом за відомою залежністю швидкості автомобіля від часу в характерних умовах руху. Збільшуючи швидкість від V_k до V_{k+1} на кожному кроці визначається значення прискорення, як показано на рис. 3, за формулою (5):

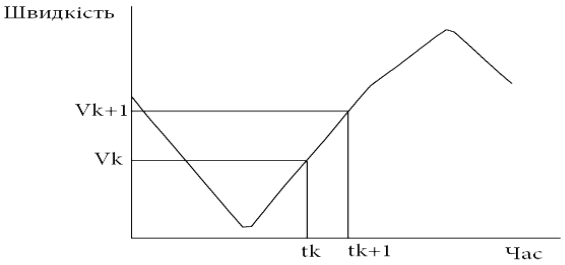

Рис. 3 – Зміни швидкості у часі.

$$\frac{dV}{dt}=\frac{V_{k+1}-V_k}{t_{k+1}-t_k}\left(k=1,2,...,n\right), \tag{5}$$

де n – кількість точок розрахунку.

Крутний момент на колесах автомобіля може бути розрахований за формулою:

$$T_w = \left(T_p - J_p \frac{d\omega_p}{dt} \right) u_{FB} u_0 \eta_t - \sum_{i=1}^{n} J_w \frac{d\omega_w}{dt}, \quad (6)$$

де T_p – крутний момент, що створюється ГСУ; $d\omega / dt$ – кутове прискорення вихідного валу трансмісії; n – кількість коліс автомобіля; $d\omega_w / dt$ – кутове прискорення колеса; J_p – приведений момент інерції трансмісії; u_{FB} – передаточне відношення коробки передач; u_0 – передаточне відношення головної передачі; η_t – коефіцієнт корисної дії трансмісії; J_w – момент інерції колеса.

Тягове зусилля на ведучих колесах може бути розраховано за формулою:

$$F_t = \frac{\left(T_p - J_p \frac{d\omega_p}{dt} \right) u_{FB} u_0 \eta_t - \sum_{i=1}^{n} J_w \frac{d\omega_w}{dt}}{r_d}, \quad (7)$$

де r_d – це динамічний радіус колеса.

З рівняння (7) отримаємо крутний момент ГСУ:

$$T_p = \frac{F_t r_d - \sum_{i=1}^{n} J_w \frac{d\omega_w}{dt}}{u_{FB} u_0 \eta_t} - J_p \frac{d\omega_p}{dt}. \quad (8)$$

Кутова швидкість коліс може бути розрахована як:

$$\omega_w = \frac{\omega_p}{u_{FB} u_0}, \quad (9)$$

де ω_p – частота обертання вихідного вала ГСУ.

Лінійна швидкість центру колеса автомобіля може бути розрахована так:

$$V = \omega_w r_d. \quad (10)$$

Кутова швидкість вихідного валу силової установки розраховується за формулою:

$$\omega_p = \frac{V u_{FB} u_0}{r_d}. \quad (11)$$

Розглянемо баланс потужності при русі автомобіля. В тяговому режимі необхідна потужність еквівалентна потужності опору та потужності, втраченої в трансмісії, тяговому моторі, силовій електроніці, батареї. Втрати потужності можна врахувати через коефіцієнти корисної дії відповідних елементів $\eta_t, \eta_m, \eta_{in}, \eta_{bat}$. ККД акумуляторної батареї η_{bat} залежить від типу батареї. ККД сучасних свинцево-кислотних батареї 0,8 – 0,9 [12].

Потужність, яку повинні розвивати силові агрегати, визначається в залежності від режимів роботи. При цьому не враховується додаткове навантаження від кондиціонеру, підсилювача рульового керування та ін.

В режимі руху від електродвигуна для визначення потрібної потужності силової установки необхідно визначити, яку потужність треба підвести до коліс автомобіля для виконання вимог експлуатаційного режиму. Розрахунок

проводиться за формулою:

$$P_m = \frac{V}{\eta_t}\left(Mgf_r cos\alpha + \frac{1}{2}\rho A_f C_D V^2 \pm M\delta\frac{dV}{dt} \pm F_g \sin\alpha \right). \quad (12)$$

При цьому, розрахунок проводиться у випадках прискорення і руху з постійною швидкістю. Будується залежність потрібної потужності від швидкості руху. Аналізуючи отримані данні можливо визначити доцільну потужність електродвигуна (ЕД).

В режимі руху за рахунок ДВЗ потужність, яку необхідно забезпечити, розраховується за формулою:

$$P_{out} = P_m . \quad (13)$$

Бажаний крутний момент визначається за формулою (8), кутова швидкість за формулою (9). Розрахунок здійснюється при зміні передаточних чисел коробки передач в залежності від швидкості, яка буде обумовлена умовами експлуатації.

Середня витрата палива протягом їздового циклу визначається за виразом:

$$G_f = \int_0^t \frac{V}{\eta_t \eta_e Q}\left(Mgf_r cos\alpha + \frac{1}{2}\rho A_f C_D V^2 \pm M\delta\frac{dV}{dt} \pm F_g \sin\alpha \right) dt , \quad (14)$$

де Q – питома теплота згоряння палива (для бензину 34,5 МДж/л); η_e – ККД ДВЗ.

В режимі руху за рахунок ЕД і ДВЗ привід ведучих коліс одночасно здійснюється за рахунок ДВЗ та ЕД. Робота кожного приводу в складі гібридної силової установки у діапазоні своєї оптимальній ефективності має важливе значення для загальної ефективності транспортного засобу. ДВЗ, як правило, має кращу ефективність за повної потужності. Відхилення від цього діапазону призведе до різкої втрати ефективності. З іншого боку, втрата ефективності в електричного двигуна не така значна в порівнянні з ДВЗ, який працює далеко від оптимального режиму.

Навантаження на транспортний засіб випадковим чином змінюється в ході експлуатації через часті прискорення, сповільнення. Потужність навантаження складається з двох компонентів: постійна (середня) та динамічна потужність. У автомобіля з ГСУ один привід, який краще працює на стаціонарних режимах ДВЗ, може бути використаний для забезпечення середньої потужності. З іншого боку, електричний привід може бути використаний для забезпечення динамічної потужності [13].

Під час руху автомобіль має певну кількість кінетичної енергії. При гальмуванні за рахунок сил тертя кінетична енергія перетворюється в теплову та розсіюється в навколишнє середовище. Потужність, яку можливо отримати за рахунок рекуперації кінетичної енергії автомобіля протягом гальмування, розраховується за формулою:

$$P_{in} = F_{tb} V \eta_t \eta_m \eta_{in} \eta_{bat} . \quad (15)$$

При цьому розрахунок проводиться тільки при сповільненні. Кількість енергії, яка втрачається при виконані їздового циклу, розраховується за формулою:

$$E = \int_0^t P_{out} dt + \int_0^t P_{in} dt \,. \tag{16}$$

Потужність генератора для здійснення регенеративного гальмування залежить від потужності, яка повинна бути на колесі автомобіля для здійснення їздового циклу. Розрахунок потужності проводиться за формулою (12), при цьому лише у випадках уповільнення.

Після визначення необхідної потужності для виконання їздового циклу визначається необхідна енергія та будується залежність розподілу необхідної енергії від швидкості автомобіля. Ця інформація є дуже корисною для проектування та керування системою рекуперативного гальмування. В діапазоні швидкостей, де розсіюється найбільша кількість енергії, гальмівна ефективність роботи електромотору, працюючого в режимі генератора, може бути найбільша. В інших швидкісних діапазонах рекуперативне гальмування можна не застосовувати.

Блок керування автомобілем з ГСУ реалізований з використанням *теорії кінцевих автоматів* [14]. Вхід автомата в кожен стан у відповідний момент часу визначається не тільки станом входів в даний момент часу, але і внутрішнім станом схеми в момент подачі вхідних сигналів. У свою чергу, внутрішній стан схеми залежить від стану її входів у попередній момент часу, а, отже, визначається послідовністю надходження вхідних сигналів. На входи комбінаційної схеми надходять зовнішні сигнали. Під впливом сигналів комбінаційна схема формує послідовність сигналів на виході. Загальна модель логіки керування представляється за допомогою моделі:

$$\begin{cases} S(t) = \varphi[X(t-1);\ S(t-1)]; \\ Z(t) = \psi[S(t)], \end{cases} \tag{17}$$

де $S(t)$, $S(t-1)$ – стан автомата в момент часу t і $t-1$; $X(t-1)$ і $Z(t)$ – вхідні та вихідні сигнали автомата в момент часу t і $t-1$.

Отже, стан $S(t)$ автомата при його описі однозначно визначається вхідними сигналами $X(t-1)$ і внутрішнім станом $S(t-1)$ в попередній момент часу $t-1$. Сигнал на виході автомата $Z(t)$ у розглянутий момент часу t в моделі Мура повністю визначається станом $S(t)$ автомата в даний момент часу.

Логіка керування реалізується за допомогою інструменту Stateflow в середовище MatLab Simulink. На рис. 4 зображена блок-схема алгоритму керування.

Результат роботи програми. Математична реалізація запропонованої методики реалізована в середовище MatLab, для зручності проведення розрахунків було створено інтерфейс для введення вихідних даних для розрахунку (рис. 5).

Пошук раціональної величини факторів здійснюється за допомогою підпрограми циклічного моделювання, яка дозволяє досліджувати вплив одночасно двох будь-яких факторів на різних рівнях (рис. 6). Такий підхід дозволяє провести вибір та обгрунтування значень максимальної потужності сило-

вої установки, розподіл потужності між ДВЗ і електродвигуном, кількість необхідної енергії для здійснення їздового циклу, ємність і потужність акумуляторної батареї, витрату палива. Також можливо підбирати оптимальні умови переходу між станами (режимами) роботи силової установки. Але отримані значення потребуватимуть подальшої перевірки.

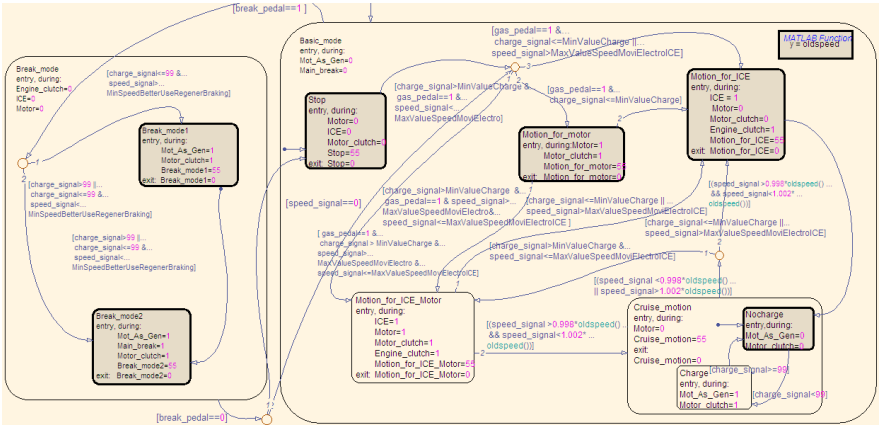

Рис. 4 – Блок-схема алгоритму керування силовою установкою автомобіля з ГСУ.

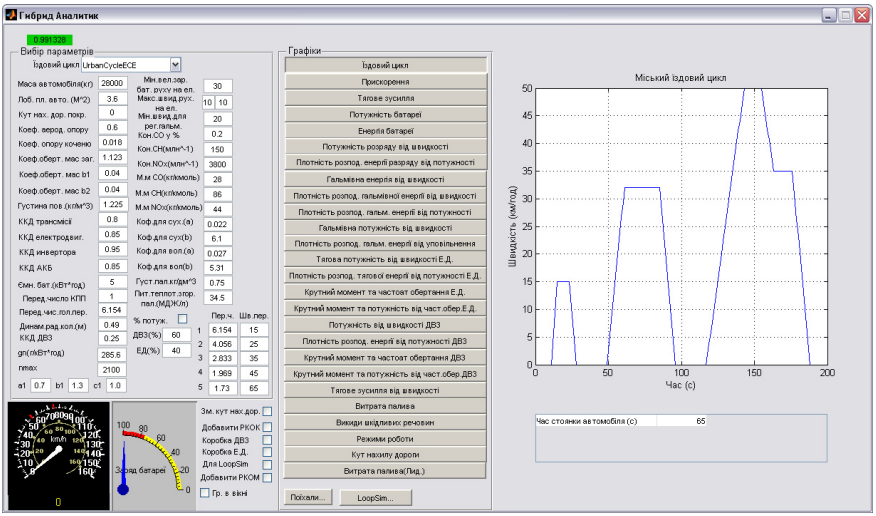

Рис. 5 – Інтерфейс програми розрахунку за методом від коліс до ЕУ.

В результаті розрахунків можуть бути отримані 3–D графічні залежності витрати палива, потужності електродвигуна, потужності ДВЗ, витрати електричної енергії в залежності від швидкості руху, до якої працює ЕД, та від співвідношення потужності агрегатів ГСУ. Для кожного графіка можна по-

будувати сімейство ізоклін, яке відповідатиме множині параметрів ГСУ та її системи керування, за яких буде виконуватись швидкісний режим руху на експлуатаційному маршруті руху, після чого постає питання обґрунтування і вибору остаточних величин цих параметрів на основі одержаних результатів.

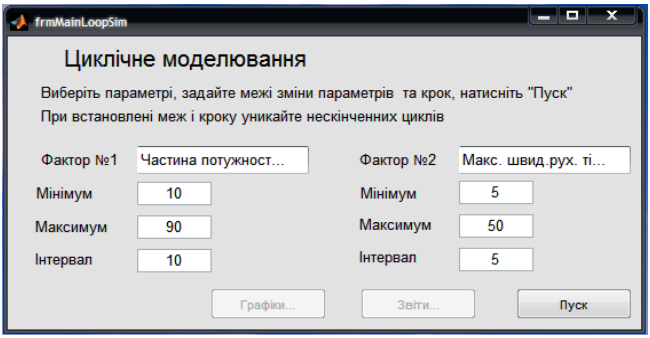

Рис. 6 – Модуль циклічного моделювання.

Перспективи подальших досліджень. При експертному оцінюванні властивостей автомобіля з ГСУ слід надавати більшу перевагу параметрам, які відповідають реальним умовам експлуатації ТЗ – їздовим циклам та/або експлуатаційним маршрутам. В подальшому планується провести обчислення параметрів ГСУ для вантажних автомобілів та провести перевірку адекватності розробленої методики експериментально.

Висновки. Розроблено математичну модель та програму розрахунку за нею в середовищі програмного продукту MatLab/Similink, що дозволяє проводити в інтерактивному режимі розрахунки за різними їздовими циклами. За допомогою цієї програми можливо: змінювати значення вихідних параметрів, вибирати режим розрахунку, спостерігати поточну швидкість автомобіля та ступінь заряду батареї, одержати графічні результати розрахунків.

Список літератури: 1. *Тімков О.М.*, *Іванов О.С.* Розподіл тягового та гальмівного зусилля на колесах автомобіля в різних їздових циклах // Харків: ХНАДУ. – Сб.наук. праць: Автомобільний транспорт. – Вип. № 29 – 2011. – С.220 – 223. **2.** *Чередниченко Ю.И.* Как выбирать параметры технических систем // «Грузовик &», 2001. – №3. С. 42 – 48. **3.** *Смирнов Г.А.* Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, – 1990. – 352 с. **4.** *Далека В.Х.*, *Харченко В.Ф.*, *Шпіка М.І.*, *Грищенко Н.О.* Тяговий привід транспортних засобів з гібридною силовою установкою // Науково-технічний збірник. – 2010. – №97 – С. 226 – 331. **5.** *Дубинен А.В.*, *Быков А.А.*, *Колобов М.Г.* Гибридный транспорт // Научно-техничиский сборник «Коммунальное хозяйство городов». – 2009. – №88. – С. 275 – 280. **6.** *Грищенко Н.О.*, *Киркин П.М.* Транспортні засоби для міських пасажирських перевезень з гібридною силовою установкою [Електронний ресурс] // Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів – 2011. – №122 – Режим доступу: http://elm-dstu-edu.org.ua/konkurs/docs/pdf/ID_122.-pdf **7.** *Сериков С.А.*, *Бороденко Ю.Н.* Силовая установка гибридного автомобиля как объект управления // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2009. – №3. – С. 45 – 30. **8.** *Сериков С.А.*, *Бороденко Ю.Н.* Гибридная силовая установка автомобиля как объект управления // ХНАДУ. – 2009. – №24. **9.** *Родзянов В.В.* Аналіз методів визначення ємності акумуляторних батарей гібридних автомобілів // Вісник ХНАДУ. – 2009. – №45. – С. 97 – 100. **10.** *Смирнов О.П.*, *Панікарський О.С.*, *Боженов В.С.*, *Смирнова А.О.* Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів // Вісник Донецького інституту автомобільного

транспорту. – 2009. – №3 – С. 50 – 54. **11.** Теория и расчет тягового привода электромобилей / *И.С. Ефремов*, *А.П. Пролыгин*, *Ю.М. Андреев*, *А.Б. Миндлин*. – М.: Высшая школа, 1984. **12.** Свинцово-кислотный_аккумулятор [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://ru.wikipedia.-org/wiki/ Свинцово-кислотный_аккумулятор. **13.** Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles / [*Mehrdod Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi*]. – Taylor & Francis Group – 2010. – 519с. **14.** Введения в теорию автоматов, языков и вычеслений, 2-е изд. / [*Хопкрофт Д.Є.*, *Мотвани Р.У.*, *Ульман Д.Д.*]. – Пер. С англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 528 с.

Bibliography (transliterated): 1. Timkov, O. M., and O. S. Ivanov. "Rozpodil tjagovogo ta gal'mivnogo zusyllja na kolesah avtomobilja v riznyh i'zdovyh cyklah." Kharkiv: HNADU. *Sb. nauk. prac': Avtomobil'nyj transport*. No. 29. 2011. 220–223. Print. **2.** Cherednichenko, Ju. I. "Kak vybirat' parametry tehnicheskih sistem." «Gruzovik &», 2001. No. 3. 42–48. Print. **3.** Smirnov, G. A. *Teorija dvizhenija kolesnyh mashin*. Moscow: Mashinostro¬enie, 1990. Print. **4.** Daleka, V. H., et al. "Tjagovyj pryvid transportnyh zasobiv z gibrydnoju sylovoju ustanovkoju." *Naukovo-tehnichnyj zbirnik*. No. 97. 2010. 226–331. Print. **5.** Dubinen, A. V., et al. "Gibridnyj transport." *Nauchno-tehnicheskij sbornik «Kommunal'noe hozjajstvo gorodov»*. No. 88. 2009. 275–280. Print. **6.** Grishhenko, N. O., and P. M. Kirkin. "Transportni zasoby dlja mis'kyh pasazhyrs'kyh perevezen' z gibrydnoju sylovoju ustanovkoju." *Elektromehanichni systemy i kompleksy transportnyh zasobiv*. No. 122. 2011. Web 04 March 2015 <http://elm-dstu-edu.org.ua/konkurs/docs/pdf/ID_122.-pdf>. **7.** Serikov, S. A., and Ju. N. Borodenko. "Silovaja ustanovka gibridnogo avtomobilja kak ob"ekt upravlenija." *Visnyk Donec'kogo instytutu avtomobil'nogo transportu*. No. 3. 2009. 45–30. Print. **8.** Serikov, S. A., and Ju. N. Borodenko. "Gibridnaja silovaja ustanovka avtomobilja kak ob"ekt upravlenija." No. 24. HNADU. 2009. Print. **9.** Rodzjanov, V. V. "Analiz metodiv vyznachennja jemnosti akumuljatornyh batarej gibrydnyh avtomobiliv." *Visnyk HNADU*. No.45. 2009. 97–100. Print. **10.** Smirnov, O. P., et al. "Vykorystannja kondensatoriv velykoi' jemnosti dlja zabezpechennja optymal'nyh parametriv roboty akumuljatornyh batarej gibrydnyh avtomobiliv." *Visnyk Donec'kogo instytutu avtomobil'nogo transportu*. No. 3. 2009. 50–54. Print. **11.** Efremov, I. S., et al. *Teorija i raschet tjagovogo privoda jelektromobilej*. Moscow: Vysshaja shkola, 1984. Print. **12.** "Svincovo-kislotnyj akkumuljator." Web. 03 March 2015 <http://ru.wikipedia.org/wiki/ Svincovo-kislotnyj_akkumuljator>. **13.** Mehrdod Ehsani, Yimin Gao and Ali Emadi. *Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. Taylor & Francis Group. 2010. Print. **14.** Hopkroft, D. Є., R. U. Motvani and D. D. Ul'man. *Vvedenija v teoriju avtomatov*, *jazykov i vycheslenij*, *2nd ed*. *Per*. *s angl*. Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2002. Print.

Надійшла (received) 06.03.2015

УДК 532.5:518.5

А.Н. СЕМКО, д-р техн. наук, проф., ДонНУ, Донецк;
Н.И. ЯГУДИНА, ассист., ДонНУ, Донецк

ОСОБЕННОСТИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ

В работе в акустической и газодинамической постановках исследованы процессы в импульсном генераторе струй жидкости. В акустической постановке рассматривалась одномерная задача без учета движения поршня и истечения струи. В газодинамической постановке численно решалась одномерная и осесимметричная задача с учетом движения поршня, истечения струи и кавитации жидкости. Проведено сравнение результатов расчетов для разных моделей движения жидкости, сделаны соответствующие выводы. Показано, что пульсации скорости струи связаны с волновыми процессами в установке.

Ключевые слова: пульсирующие струи жидкости, жидкие диски, импульсный генератор струй, кавитация, численное моделирование.

© А. Н. Семко, Н. И. Ягудина, 2015