

*М. Є. СЕРГІЄНКО, Н. М. ПАВЛОВА, А. М. СЕРГІЄНКО, Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ,  
А.М. БОРИСЕНКО, П.М. КАЛИНИН, С.О. ГУБСКИЙ, О.М. ДРЕВАЛЬ*

## **РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ І РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ**

У роботі представлені імітаційні моделі системи керування і контролю, виконано дослідження динаміки параметрів елементів гібридного автомобіля за допомогою імітаційного моделювання у середовищі Matlab / Simulink. Розглядається послідовно-паралельний привід повідних коліс. Електропривід здійснюється від асинхронного електродвигуна. Модель містить підсистеми регулювання і контролю споживання енергії, обчислення і контролю стану АКБ, ДВЗ, електричного приводу, механічну модель автомобіля, імітатор впливу водія на подачі палива, систему керування режимами руху. Представлені зміни параметрів компонентів гібридного автомобіля і самого автомобіля на заданих режимах руху. Отримані результати відповідають реальним значенням для вибраного класу автомобілів.

**Ключові слова:** автомобіль, гібрид, послідовно-паралельна схема, асинхронний електродвигун, моделювання, компоненти, система керування і контролю, робочий процес, аналіз.

*M. SERGIENKO, N. PAVLOVA, A. SERGIENKO, B. LYUBARSKY, A. BORYSENKO,  
P. KALININ, S. GUBSKYI, O. DREVAL*

## **RESULTS OF MODELING OF COMPONENTS AND WORKING PROCESSES OF A HYBRID CAR WITH AN ASYNCHRONOUS MOTOR**

The work presents simulation models of the control and monitoring system, the study of the dynamics of the parameters of the elements of a hybrid car using simulation modeling in Matlab / Simulink environment is performed. A series-parallel drive of driving wheels is considered. The electric drive is carried out from an asynchronous electric motor. The model includes energy consumption regulation and control subsystems, calculation and state control of the battery, internal combustion engine, electric drive, mechanical model of the car, simulator of driver's influence on the fuel pedal, driving mode control system. The changes in the operating parameters of the hybrid vehicle components and the vehicle itself on the given driving modes are presented. The results obtained correspond to the real values for the selected class of cars.

**Keywords:** car, hybrid, series-parallel scheme, induction motor, modeling, components, control and monitoring system, workflow, analysis.

**Вступ.** Гібридний автомобіль (ГА), як технічна система, містить двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), електричний двигун (ЕД), механічну трансмісію (МТ), генератор, акумуляторну батарею (АКБ), перетворювач напруги, електронний керуючий блок (ЕКБ).

Джерелами енергії для руху ГА є ДВЗ і ЕД, які перетворюють енергію відповідних накопичувачів (або перетворювачів) в механічну. Очевидно, що для ефективної роботи вказаних джерел енергії потрібна наявність не тільки підсумовуючого пристрою, засобів контролю і керування, що забезпечують раціональні режими роботи всіх перетворювачів, але потрібна організація їх погодженої та взаємопов'язаної роботи.

Для практичної реалізації вищесказаного необхідно проведення теоретичних досліджень, в ході яких відпрацьовується структура системи керування ГА і алгоритм її роботи. При моделюванні процесів руху ГА, як правило, застосовується метод енергетичного балансу. У даній праці розглянутий варіант ГА з послідовно-паралельною гібридною силовою установкою, для керування рухом якого пропонується достатньо гнучка і логічна схема керування, що враховує три режими руху (прискорення, сталого руху, гальмування) і стан накопичувачів електроенергії та перетворювачів. Дослідження у зазначеному напрямку актуальні, так як дозволяють оптимально організувати перетворення енергії накопичувачів і ефективно використовувати ГА.

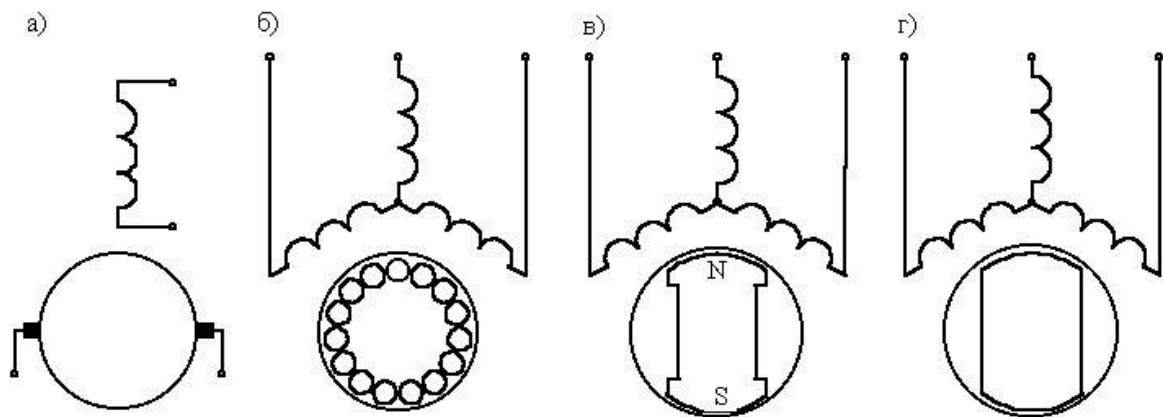
**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Застосування електроперетворювачів сьогодні здійснюється не тільки на електромобілях, гібридних машинах, але і на автомобілях традиційної конструкції [1].

У систематизованому довіднику [2] представлені нові технології, що присвячені як основам теорії, так і розробці конструкцій електромобілів (EV), гібридних електромобілів (HEV) і автомобілів на паливних елементах (FCV), що дозволяє уявити принципіальні характеристики вибраного автомобіля, конфігурацію складових елементів конструкції, стратегію керування.

ГА із застосуванням оптимального керування гібридними системами для декілька прикладних проблем, що виникають в технології будування гібридних транспортних систем, розглянуто в праці [3].

У праці [4] моделювання і регулювання системи керування HEV виконується з метою економії палива. Для підвищення ефективності використання палива в ГА запропоновано об'єднати в єдину систему електродвигун, акумулятор і ДВЗ. В цієї системі контролер Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) використовувався у тесті водіння транспортного засобу в програмному середовищі Matlab/Simulink. Слід зазначити, що контролер задає як бажану швидкість руху, так і рівень заряду акумулятора. Реалізація оптимального керування організовано на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу, яка знижує витрати палива ДВЗ.

На практиці для ГА застосовують чотири різновиди електродвигунів: двигун постійного струму (ДПС), асинхронний двигун (АД), синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) і синхронний реактивний двигун (СРД). На рис. 1 схеми цих електродвигунів умовно показані з трифазною обмоткою статора і двополюсним ротором, хоча на практиці число фаз і полюсів, як правило, більше.



а – ДПС; б – АД; в – СДПМ; г – СРД

Рис. 1 – Найбільш поширені типи електродвигунів для ГА

Відзначимо, що використовувані в ГА джерела енергії (ДВЗ і ЕД) спільно або порізно через редуктор обертають ведучі колеса. При установленні поза ДВЗ планетарного механізму відбувається поділ потоку потужності на дві гілки: одна йде до редуктора головної передачі, інша – до генератора перемінного струму. Останній через перетворювач заряджає акумуляторну батарею, від якої при необхідності енергія потрапляє на електродвигун. При гальмуванні електродвигун діє в режимі генератора і через перетворювач поповнює запас енергії в акумуляторній батареї. В режимі пуску ДВЗ генератор виконує роль стартера.

Для оцінки доцільності використання в ГА відповідного типу електродвигуна необхідний порівняльний аналіз їх основних показників (табл. 1).

З аналізу табл. 1 і аналізу конструкцій ГА випливає, що асинхронний і синхронний двигуни перспективні для використання на ГА.

Таблиця 1 – Порівняльні показники різних типів електродвигунів [5]

| Показники   | ДПС | АД | СПДМ | СРД |
|---|-----|----|------|-----|
| ККД   | 0   | +  | ++   | +   |
| Відношення максимальної корисної потужності до маси   | 0   | +  | ++   | +   |
| Можливості охолодження  | +   | ++ | +    | +   |
| Експлуатаційні характеристики   | 0   | +  | +    | +   |
| Динамічні характеристики  | ++  | +  | ++   | +   |
| Вага  | –   | +  | ++   | ++  |
| Вартість  | ++  | +  | –    | +   |
| Примітка. Показник: "++" – відмінний, "+" – добрий, "0" – задовільний, "–" – менш задовільний |     |    |      |     |

Асинхронні електродвигуни мають просту, міцну конструкцію, високу надійність, низькі експлуатаційні витрати, низьку вартість і здатність працювати в несприятливих умовах. Відсутність тертя щіток дозволяє асинхронному електродвигуну досягати максимальної частоти обертання, а відповідно високих вихідних характеристик. Такий електродвигун може працювати таким же чином, як і електродвигун з незалежним збудженням, він не має таких обмежень частоти як двигун постійного струму.

Наявність максимального обертального моменту обмежує діапазон потужності асинхронного електродвигуна. При критичній частоті обертання електродвигуна досягається максимальний обертальний момент.

Що стосується недоліків електродвигуна, то його ККД нижче, чим у синхронного двигуна з постійними магнітами і синхронного реактивного двигуна унаслідок відсутності обмотки ротора і втрат в роторі. При цьому СПДМ і СРД конструктивно більш складні, вартість їх виготовлення вище.

Результатами моделювання ГА з використанням АД, зокрема, з послідовно-паралельним електроприводом присвячено ряд праць [6-12]. Дослідження проводилися з використанням універсальних програмних пакетів.

Тяговий електропривід ГА з вентильним двигуном докладно досліджений в праці [13].

У працях [14-16] розглянуті моделі ГА з використанням синхронних двигунів і послідовно-паралельним приводом, а також порівнюються показники автомобіля з іншими варіантами ЕД.

Аналізу роботи електроприводу на базі асинхронного електродвигуна присвячені дослідження [17], де були визначені динамічні характеристики ГА.

Показники руху і витрати накопиченої енергії ГА багато в чому визначаються роботою компонентів системи керування: їх конструкцією і алгоритмом роботи. Оцінку їх роботи можливо виконати шляхом імітаційного моделювання перехідних процесів в розглянутих складених компонентах системи керування на можливих режимах ГА, що вимагає відносно мінімальних витрат і стає актуальною задачею.

**Мета та постановка задачі.** Метою даної роботи є моделювання складових компонентів системи керування, контролю та узгодження робочих процесів у ГА з асинхронним електродвигуном на різних режимах руху.

**Результати моделювання компонентів і робочих процесів гібридного автомобіля з асинхронним електродвигуном.** Імітаційне моделювання робочих процесів ГА з комбінованою силовою установкою виконувалось на базі програмного середовища Matlab/Simulink.

Енергія від ДВЗ і від АКБ через ЕД передавалася на підсумувач і далі через елементи трансмісії на ведучі колеса. Взаємодія коліс автомобіля з опорною поверхнею задає параметри руху автомобіля.

Пропонована імітаційна модель ГА містить декілька підсистем: систему регулювання споживання енергії, ДВЗ, електричний привід (АКБ, ЕД), механічну модель автомобіля, імітатор впливу водія на педаль подачі палива [13-16]. В розробленій імітаційній моделі енергія від ДВЗ і від АКБ через ЕД передається на підсумувач і далі через елементи трансмісії на ведучі колеса, які взаємодіють з дорогою, задають швидкість руху автомобіля.

Розроблена система керування гібридною системою виконує наступні функції:

1) автоматичне вимикання двигуна на холостому ході для скорочення витрат енергії;  
2) управління ККД приводу: у разі малого ККД система керування дає автомобілю можливість рухатися тільки за рахунок енергії електродвигуна, а у разі високого ККД двигуна – забезпечує вироблення та збереження надлишкової електроенергії. Таке управління дозволяє домогтися максимального сумарного ККД автомобіля;

3) використання режиму EV (режиму електромобіля): якщо водій натискає перемикач при виконанні відповідних умов, автомобіль буде рухатися тільки від енергії ЕД;

4) допоміжне використання електродвигуна: при розгоні енергія електродвигуна додається до енергії ДВЗ;

5) рекуперативне гальмування: під час уповільнення, а також при натисненні педалі гальма частина енергії, яка зазвичай була б втрачена у вигляді тепла, накопичується у вигляді електричної енергії, що підлягає повторному використанню, наприклад, для живлення електродвигуна.

Розглянемо більш докладно складові компоненти запропонованої системи керування ГА: систему енергетичного контролю, системи керування ДВС, генератора, АКБ.

Підсистема енергетичного контролю (рис. 2) обчислює необхідний для руху ГА крутний момент ДВЗ і момент, необхідний для його зупинення, коли гібридний режим роботи ГА виключений.

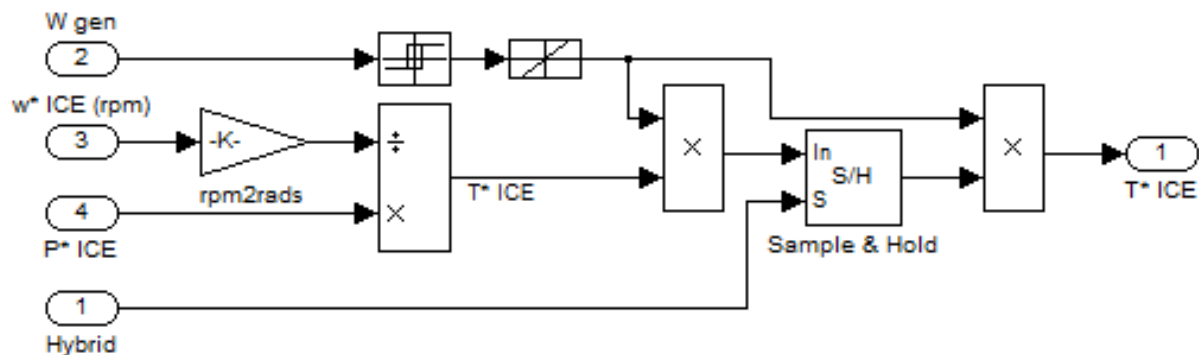


Рис. 2 – Підсистема, яка обчислює необхідний крутний момент ДВЗ

Система енергетичного контролю встановлює базовий сигнал для електродвигуна, генератора і ДВЗ, який дозволяє точно розподілити енергію від цих трьох джерел. Енергетичний контроль здійснюється у відповідності з даними про режим руху ГА і ступені натискання водієм педалі акселератора.

На рис. 3 представлена підсистема, що контролює стан АКБ.

Дана підсистема підтримує АКБ в зарядженому стані в діапазоні (40-80) % (рис. 4), щоб уникнути перезарядки або недозарядки. У відповідності з цим стан заряду АКБ поділяється на п'ять рівнів і на кожному рівні використовується алгоритм регулювання споживання енергії. В діапазоні (40-60) % стан заряду АКБ вважається на достатньому рівні. На цьому

рівні автомобіль рухається в «безшумному» режимі зі швидкістю нижче 40 км/год. ДВЗ працює в оптимальному режимі, залишкова потужність використовується генератором для зарядження АКБ. Коли заряд АКБ збільшується з 60 % до 90 % ГА продовжує працювати в режимі споживання енергії, але енергія запасастся шляхом рекуперативного гальмування. Це означає, що надлишкова потужність ДВЗ використовується генератором тільки для постачання енергією електродвигуна. Коли заряд АКБ буде в діапазоні (10-40) % «безшумний» режим руху автомобіля припиняється. Робота ДВЗ на низьких швидкостях не

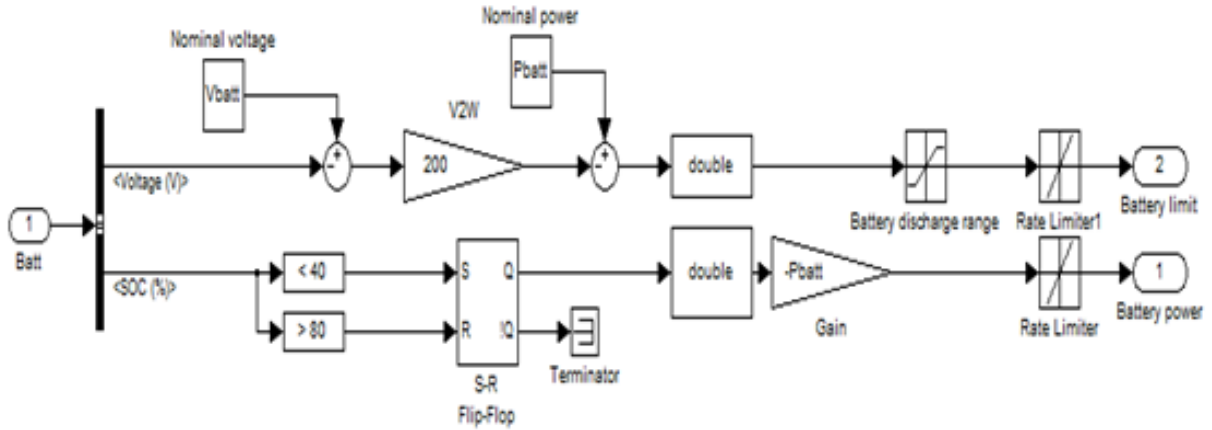


Рис. 3 – Підсистема контролю стану АКБ

ефективна, його надлишкова потужність використовується генератором для зарядження АКБ. Коли заряд АКБ нижче 10 %, тобто досягається критичний рівень заряду батареї, система енергетичного контролю сконцентрована на відновленні потрібного заряду АКБ.

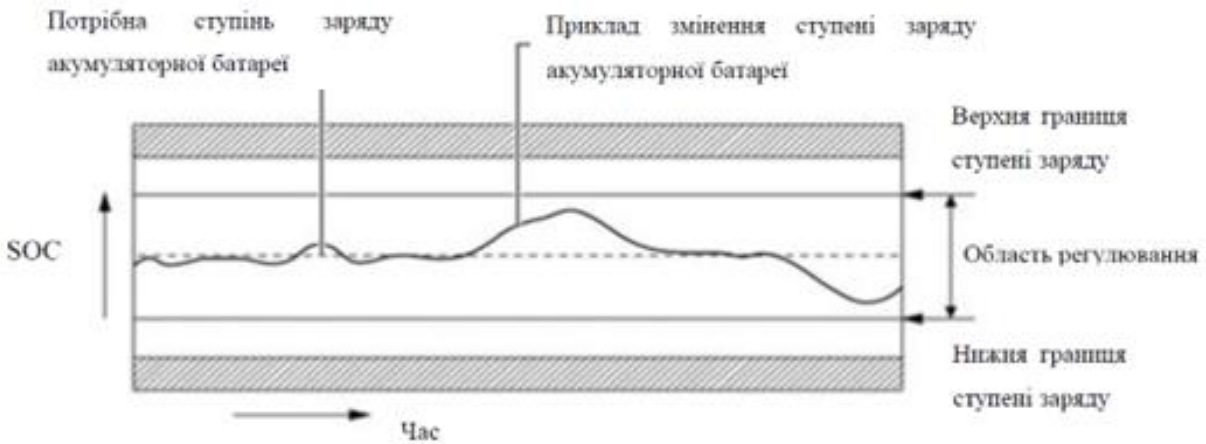


Рис. 4 – Приклад зміни заряду АКБ

Для попередження падіння напруги АКБ в імітаційній моделі керування ГА передбачено також підсистема контролю потужності, необхідної від АКБ (рис. 5).

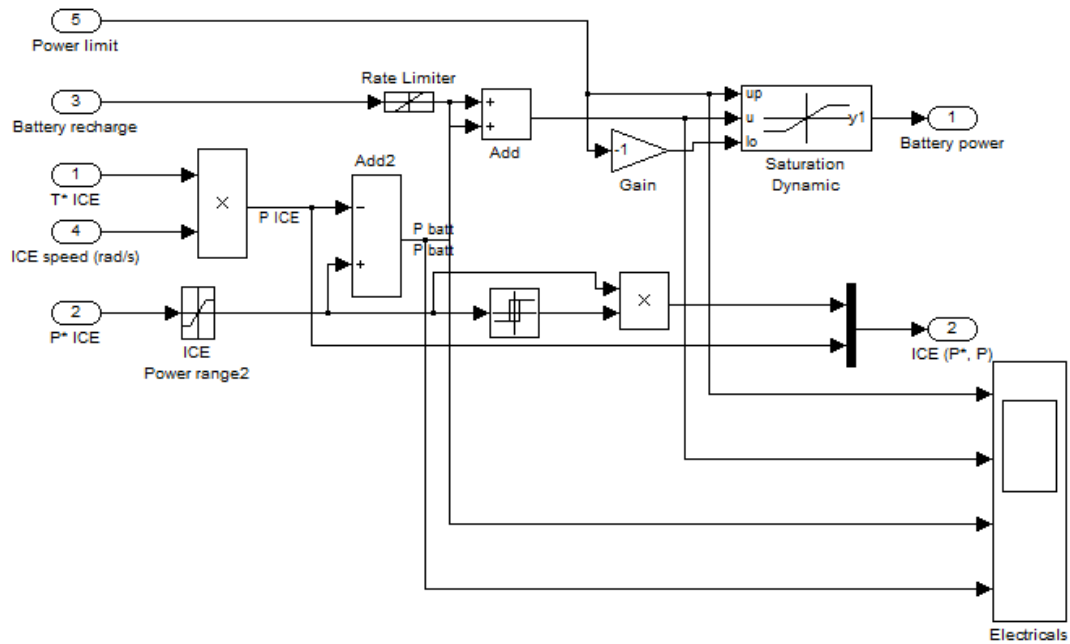


Рис. 5 – Підсистема для контролю заряду АКБ

Варто зауважити, що в розробленій імітаційній моделі була реалізована також одна з основних функцій системи регулювання споживання енергії – діагностування стану силової установки за допомогою підсистеми керування рухом (рис. 6). Підсистема керування рухом за необхідності приймає рішення, коли потрібно увімкнути гібридний режим руху ГА, а коли відключити.

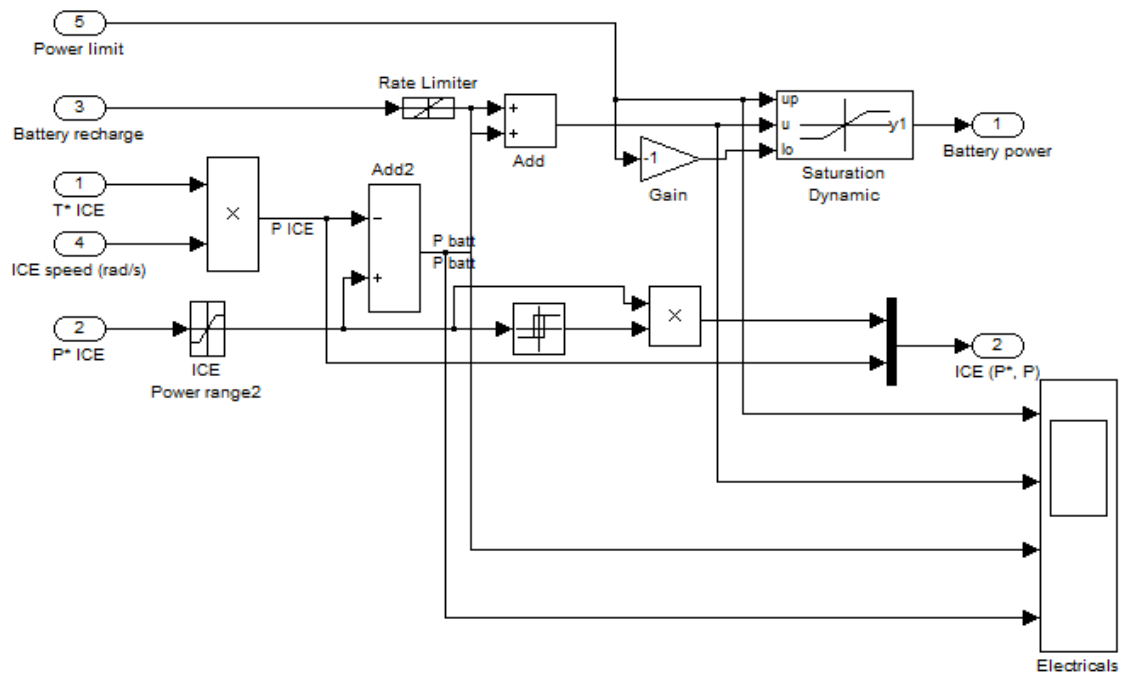


Рис. 6 – Підсистема керування режимами руху

Загальна схема запропонованої імітаційної моделі підсистеми енергетичного контролю представлена на рис. 7.

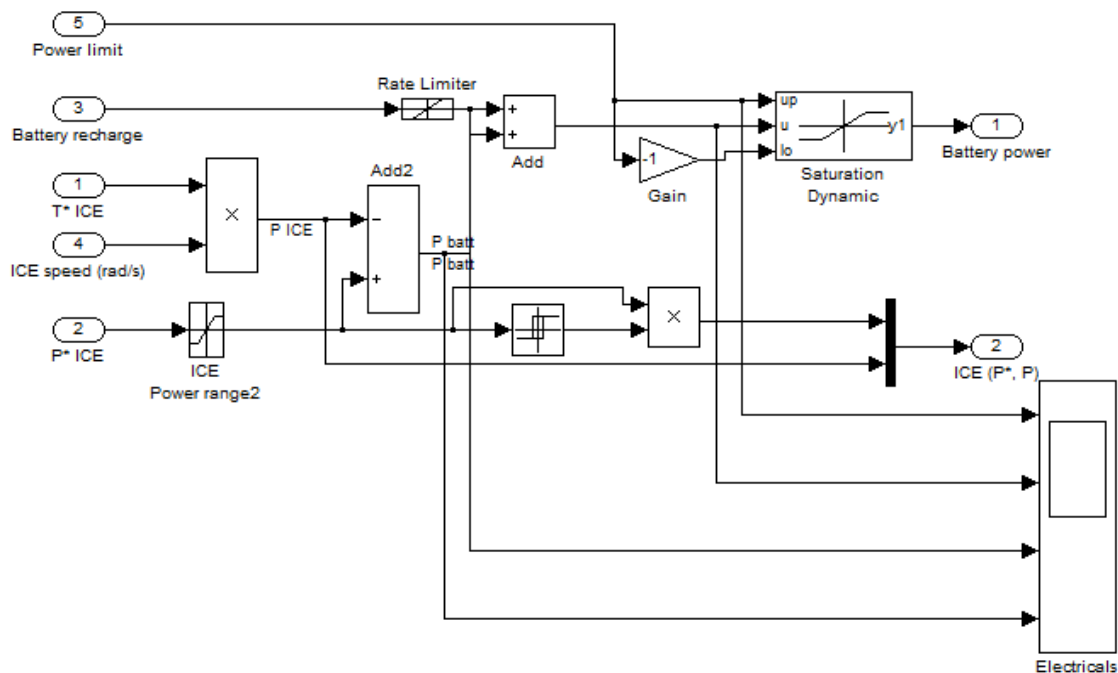


Рис. 7 – Підсистема енергетичного контролю

Найкращі показники ГА досягаються за рахунок комбінованого підведення потужності в трансмісії від ДВЗ і ЕД.

На рис. 8 представлена модель запропонованої гібридної трансмісії. За основу було взято гібридна силова установка змішаного типу, що дозволяє ефективно використовувати ДВЗ і ЕД. Основними компонентами даної моделі є наступні підсистеми: регулювання споживання енергії, підсистема ДВЗ, планетарного механізму, підсистеми електрична та динаміки автомобіля.

Підсистема регулювання споживання енергії (Energy Management Subsystem) встановлює базовий сигнал для електродвигуна, генератора і ДВЗ для того, щоб точно розподілити енергію від цих трьох джерел.

У підсистемі ДВЗ (Internal Combustion Engine) побудована модель бензинового двигуна з регулятором швидкості без врахування динаміки згорання паливно-повітряної суміші.

Підсистема планетарного механізму (Planetary Gear Subsystem) моделює розподільник потужності, що регулює напрямок потоків потужності і узгоджує роботу ДВЗ, генератора і електродвигуна на різних режимах роботи ГСУ.

Електрична підсистема (Electrical Subsystem) складається з чотирьох частин: асинхронного електродвигуна, генератора, нікель-металогідридної АКБ і перетворювача напруги, що включає до себе конвертор, перетворюючий (понижуючий) змінну напругу у постійну для узгодження змінної напруги генератора з постійною напругою високовольтної АКБ і інвертор, який підвищує постійну напругу АКБ в напругу, що живить електродвигун і генератор.

Підсистема динаміки автомобіля (Vehicle Dynamics) моделює силові процеси в трансмісії та взаємодії ведучих коліс автомобіля з дорогою:

- одноступінчаста головна передача знижує частоту обертання від ЕД і збільшує крутний момент на веденій шестерні головної передачі, яка пов'язана з диференціалом;

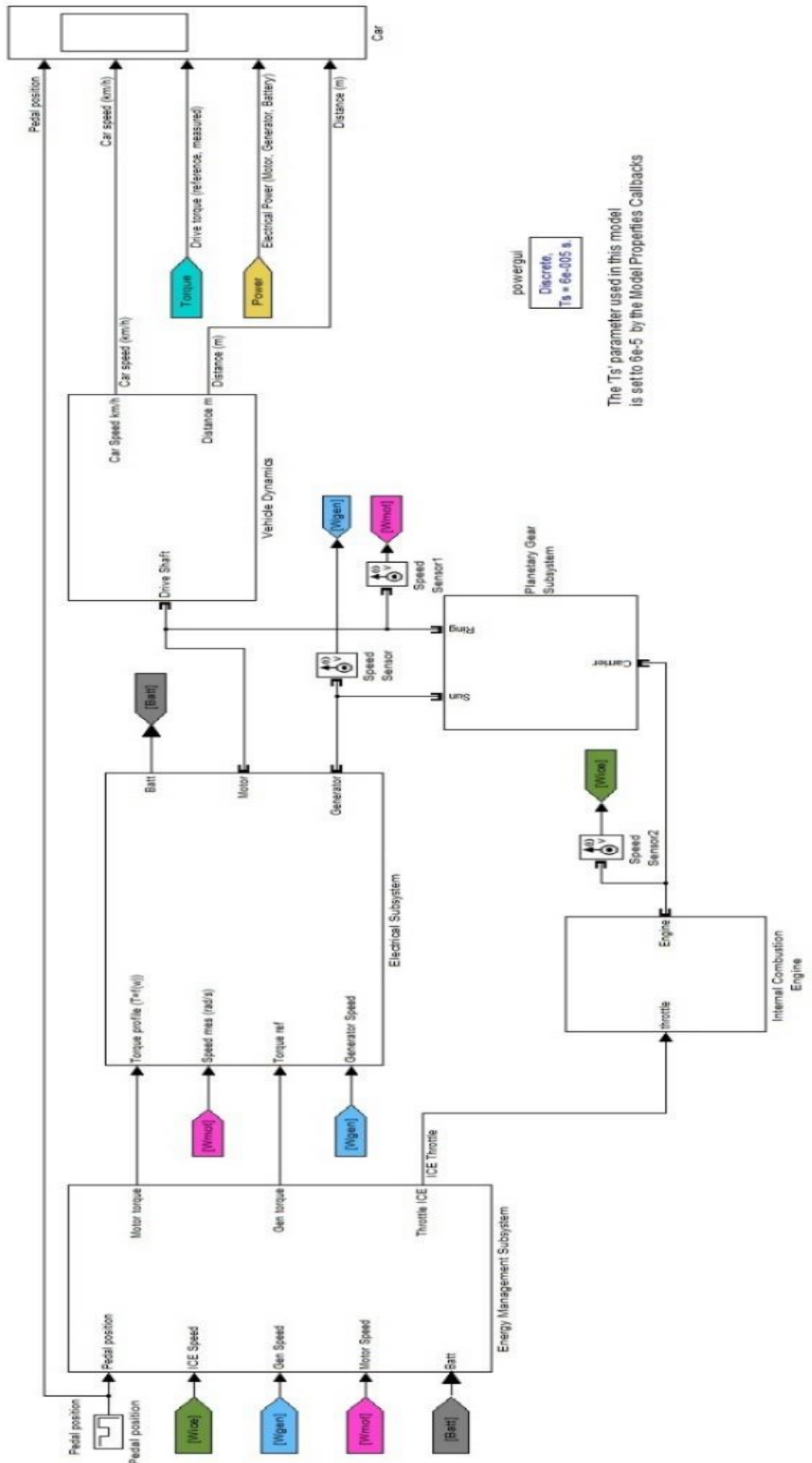


Рис. 8 – Simulink-модель трансмісії гібридної силової установки



- диференціал розділяє крутний момент на вхідному валу на два однакових за величиною крутних моментів, який підводиться на кожне ведуче колесо;
- динаміка шин показує зміну реакцій взаємодії шин з дорогою;
- динаміка автомобіля показує вплив зовнішніх сил на розглянуту систему в цілому.

Дослідження проводилося на прикладі легкового автомобіля колісної формули 4x2, масою 1325 кг, коефіцієнтом аеродинамічного опору кузова автомобіля  $C_x = 0,26$ , площею лобового опору автомобіля (площа Міделя)  $2,57 \text{ м}^2$ , потужністю ДВЗ і електросилової установки 57 кВт і 22,3 кВт, відповідно. Лінійна напруга 500 В. Ємність накопичувача енергії – акумулятора нікель-металогібридної батареї – 6,5 А·год (напруга 200 В).

Результати моделювання робочих процесів ГА наведені нижче.

Керування швидкістю руху ГА і, відповідно, режимами руху ГА здійснювалось зміною положення педалі подачі палива (рис. 9). У роботі розглядалися: гібридний режим – привід працює від електродвигуна або ДВЗ; режим швидкого переміщення – привід працює одночасно від електродвигуна і ДВЗ; рекуперативне гальмування – кінетична енергія поступальних і обертальних мас ГА передається генератору. У останньому випадку момент опору обертання генератора визначається величиною струму в обмотці збудження, величина якого визначається положенням педалі подачі палива.

Зміна положення педалі подачі палива задавалася ступінчасто. При позитивному значенні відхилення педалі здійснювався розгін або сталий рух, а при негативному – рекуперативне гальмування.

З осцилограми реєстрованих процесів видно (рис. 9), що керуючі впливи чітко відслідковуються зміною швидкості і пройденого шляху ГА.

Розгін ГА здійснювався до швидкості 80 км/год. При необхідності істотного збільшення швидкості знадобиться збільшення потужності перетворювачів.

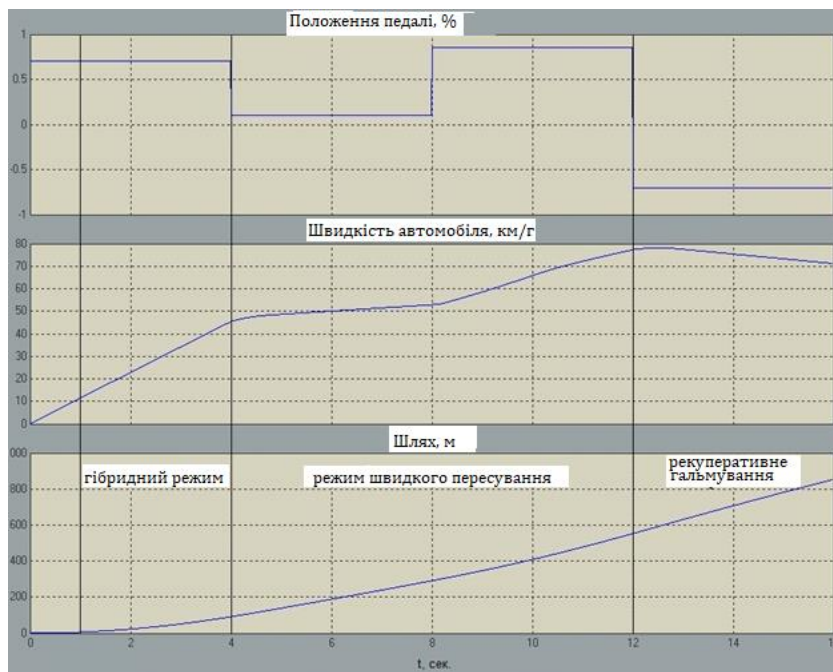


Рис. 9 – Зміна параметрів ГА в процесі руху

Моделювання компонентів керування перетворювачів вимагає визначення змін потужності не тільки ДВЗ, але і електродвигуна, генератора і АКБ (рис. 10). Особливістю запропонованої схеми керування є то, що в режимі рекуперативного гальмування тяговий ЕД переходить в режим генератора. Генератор підзарядки АКБ переходить на режим

нульовій потужності. Для АКБ негативні значення потужності відповідають режиму зарядження.



Рис. 10 – Зміна потужності електродвигуна, генератора і АКБ в процесі руху

Особливість роботи підсистеми електромеханічних перетворювачів ГА полягає в тому, що спостерігається спізнювання переходу з одного режиму на інший. Це пов'язано з перехідними електромагнітними, електрохімічними процесами в них при перемиканні режимів роботи і при ступінчастому керуючому сигналі.

Важливим показником роботи електромеханічних перетворювачів енергії, компонентів керування і контролю робочих процесів є зміна крутного моменту на вихідному валу приводу ведучих коліс. На осцилограмі (рис. 11) наведено отриманий і теоретичний крутний момент на розглядуваних режимах руху. На гібридному режимі і режимі швидкого пересування відхилення цих крутних моментів незначне. У режимі рекуперативного гальмування спостерігається істотне розходження цих моментів. Останнє пов'язано, скоріш за все, з недостатнім впливом на педаль керування дросельною заслінкою. Проведені тестові дослідження показали необхідність подальшого уточнення в підсистемі керування генератором для режиму рекуперативного гальмування ГА.

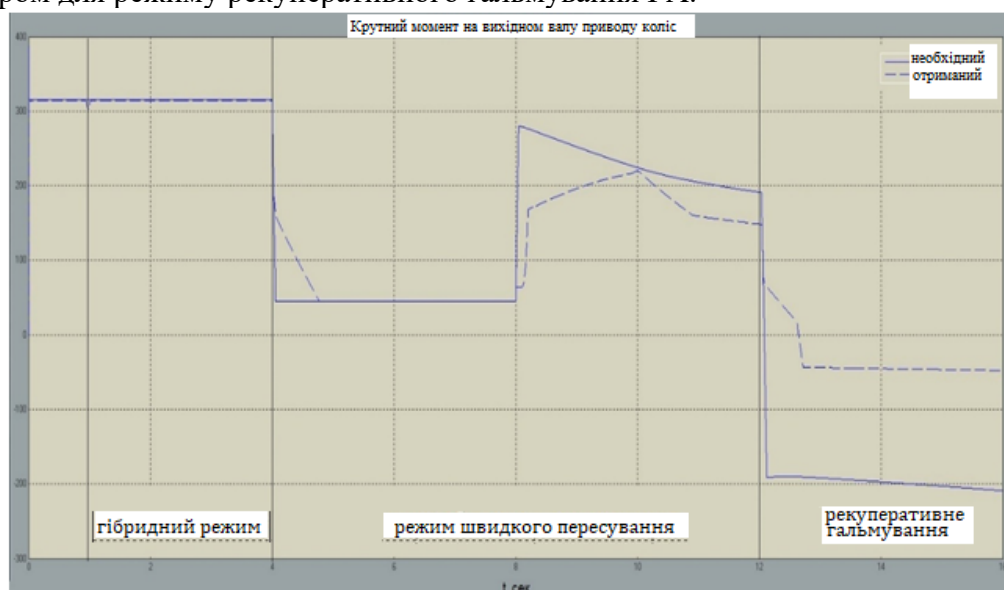


Рис. 11 – Зміна крутного моменту привода в процесі руху ГА

У ГА може використовуватися ДВЗ для привода ведучих коліс і (або) генератора. Його вихідні параметри визначаються режимами руху автомобіля, що задаються, і ступенем заряду АКБ. Система керування при низькому заряді АКБ автоматично вмикає в роботу ДВЗ і, приводячи в дію генератор, здійснює підзарядку. Приклад зміни параметрів ДВЗ при ступінчастому керуванні подачею палива наведено на рис. 12.

Аналіз результатів дослідження запропонованої імітаційної моделі керування показує, що режими роботи ДВЗ визначаються, в першу чергу, положенням дросельної заслінки і станом заряду АКБ. При ступінчастому переміщенні дросельної заслінки наростання крутного моменту і обертів колінчастого валу ДВЗ здійснюється за законом близькому до лінійного.

У прийнятій схемі трансмісії ГА сумування потоків потужності від ДВЗ, ЕД і до генератора здійснює планетарний ряд. Кожний перетворювач енергії пов'язаний в цьому випадку з одним із елементів ряду. Зміна показників стану елементів планетарного ряду в процесі руху наведено на рис. 13.

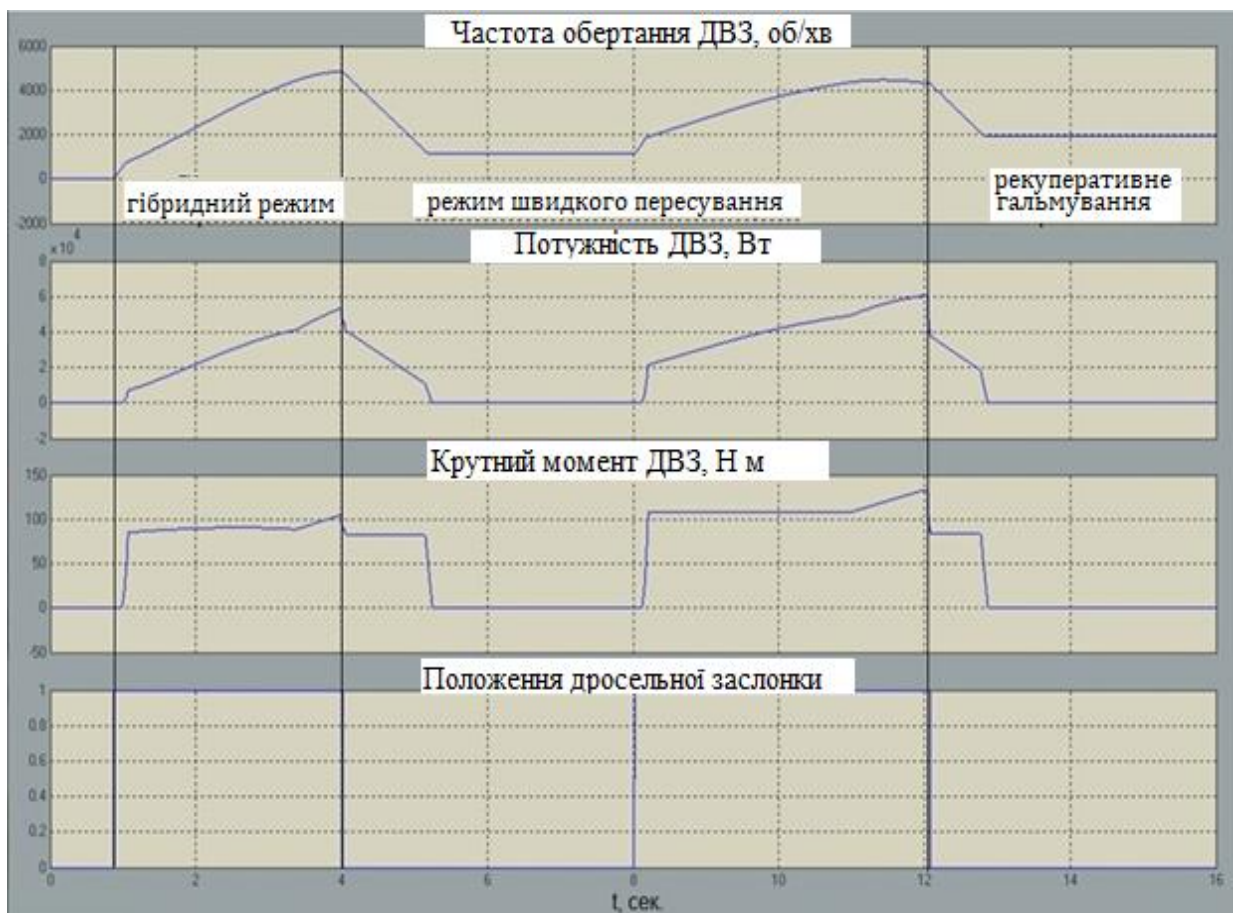


Рис. 12 – Зміна параметрів ДВЗ в процесі руху

Особливістю організації робочого процесу в ГА є те, що в режимі розгону та гальмування привід генератора може бути відключеним. Це пов'язано з неефективною роботою ДВЗ (з низьким ККД) на початку розгону ГА, а після виходу на режим підвищеної ефективності запропоновано частину потужності ДВЗ витратити на привід генератора.



В режимі гальмування ГА генератор зупиняється тому, що механічну енергію перетворює в електричну ЕД, який переключається на роботу в режимі генератора.

Запропонована імітаційна модель керування дозволяє контролювати зміни кутовій швидкості ведучих коліс (рис. 13 (а-б)) на режимах руху, що задаються. На кожному з режимів руху темп зростання та убавання швидкості відрізняється. За характером зміни швидкості руху можна оцінити показники руху ГА і при необхідності провести корегування алгоритму керування. У імітаційній моделі при зміні коефіцієнта зчеплення ведучих коліс з дорогою і опору руху можливо провести оцінку гальмування або юзу ведучих коліс.

Одним з найважливіших компонентів для системи керування ГА, що здійснює циклічне накопичення і віддачу електричної енергії, є АКБ. Від стану і параметрів АКБ багато в чому залежать показники ефективності роботи ГА в цілому.

Умови роботи АКБ на ГА істотно відрізняються від роботи на автомобілях традиційної конструкції, зокрема, темп і циклічність заряду-розряду АКБ на ГА значно інтенсивніше. При цьому показники, що впливають і характеризують стан АКБ на ГА, залишаються практично такими ж, що і в звичайних автомобілях.

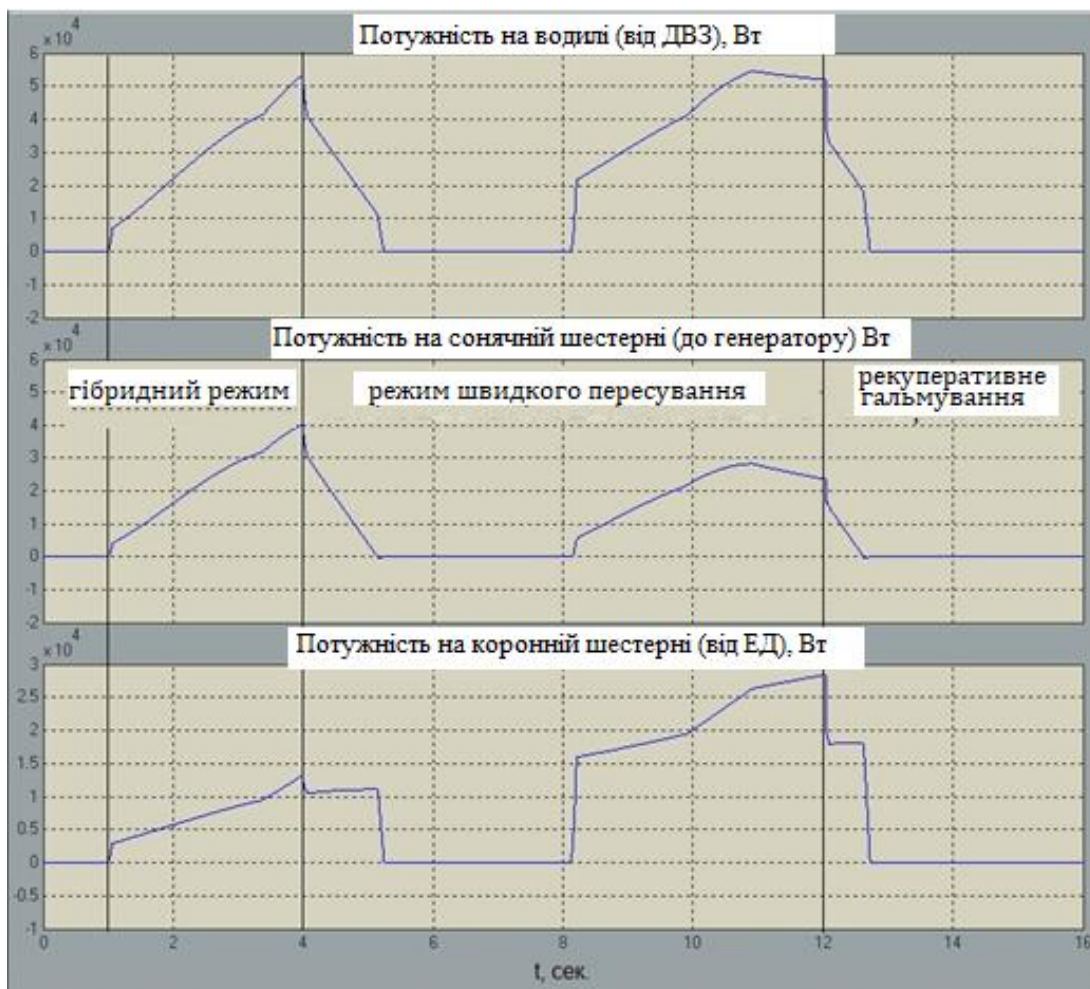


Рис. 13 (а) – Зміна параметрів планетарного механізму в процесі руху

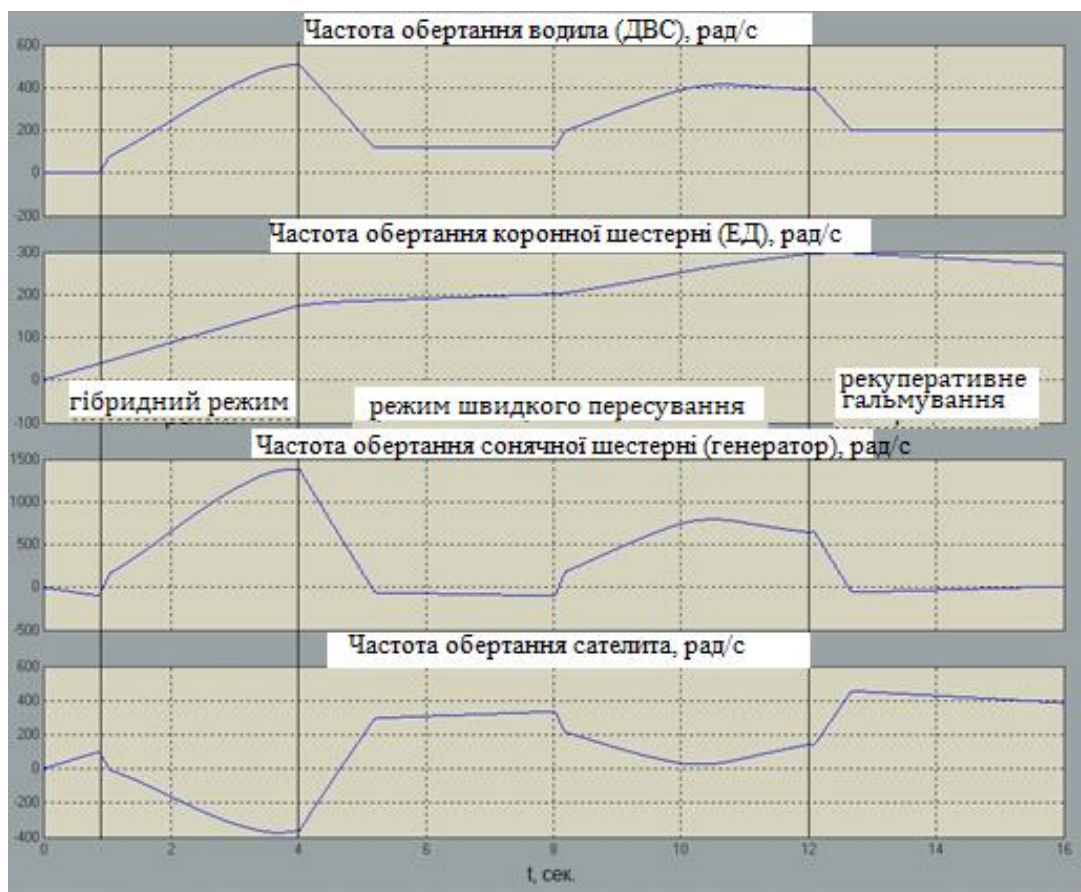


Рис. 13 (б) – Зміна параметрів планетарного механізму в процесі руху



Рис. 14 – Зміна кутової швидкості повідних коліс

На рис. 15 наведені осцилограми процесів зміни струму і напруги АКБ при русі ГА. Оцінюючи значення струму і напруги доцільно розглянути питання використання паралельно з АКБ іншого накопичувача енергії. Наприклад, це можуть бути

суперконденсатори, які мають велику ємність і значно більшу кількість циклів заряду-розряду. При цьому вони здатні віддавати електричну енергію за менший проміжок часу, а це, безумовно, може покращити динаміку ГА і знизити навантаження на АКБ.

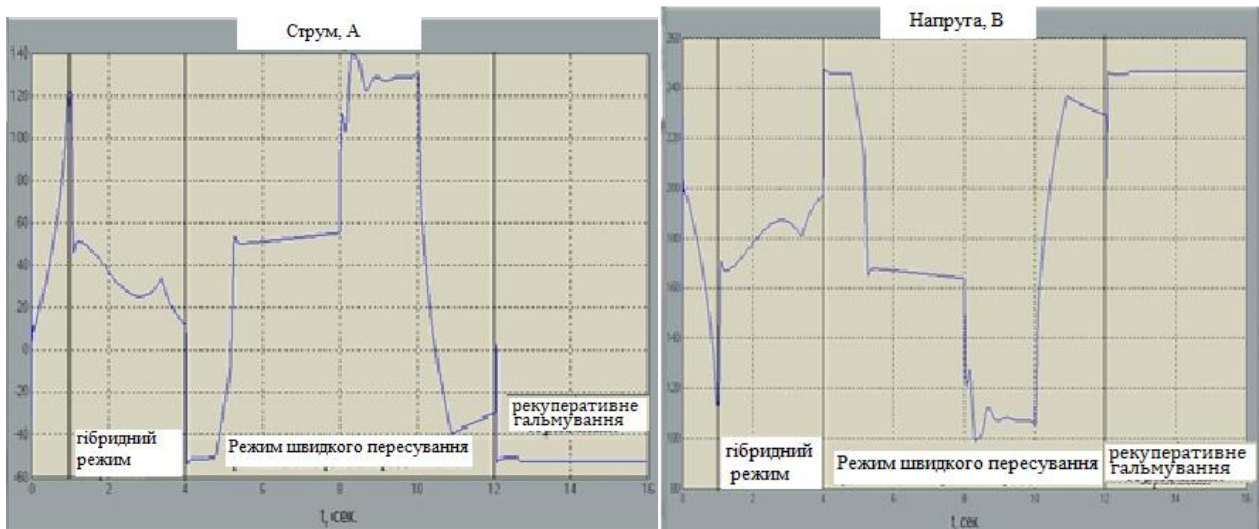


Рис. 15 – Зміни параметрів АКБ в процесі руху

Відзначимо, що розроблена модель керування ГА дозволяє контролювати стан заряду АКБ, розраховувати потужність як ту, що віддається (позитивні значення), так і ту, що накопичується (негативні значення), при русі (рис. 16). Процент заряду АКБ визначає увімкнення перетворювачів енергії, а характер представлених кривих наочно показує темп зміни ємності АКБ. Отримані дані використовуються в системі керування ГА і дозволяють підвищити надійність пристроїв електричної частини ГА.

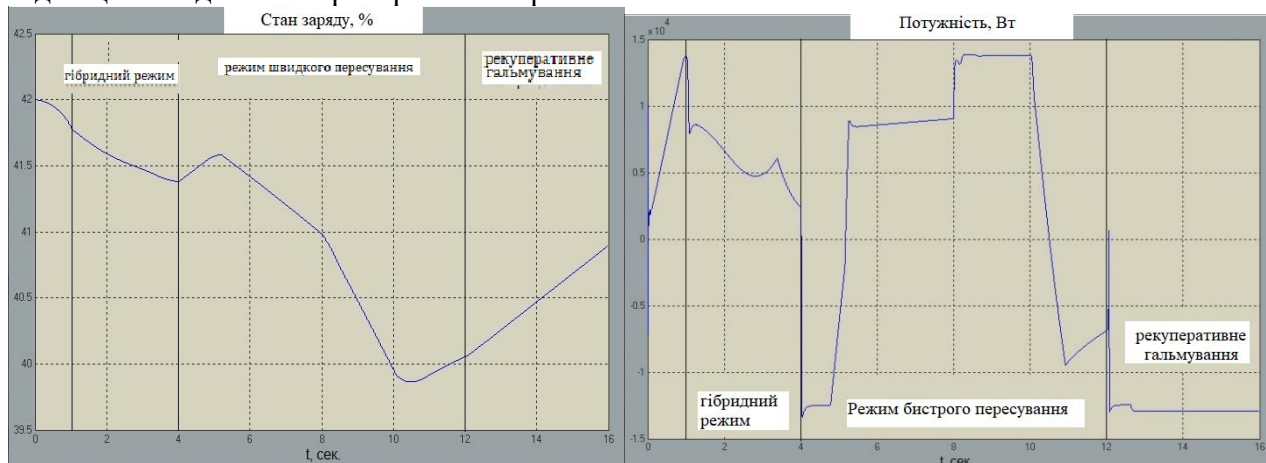


Рис. 16 – Зміни параметрів АКБ в процесі руху

### Висновки.

Аналіз джерел інформації показав доцільність проведення досліджень ГА з послідовно-паралельною приводом з використанням асинхронного електродвигуна.

Встановлено основні компоненти системи керування ГА, які забезпечують необхідне управління, розподіл енергії та контроль стану перетворювачів за заданим алгоритмом.

Використання при моделюванні системи енергетичного контролю ГА накопичувачів та перетворювачів і управляючої дії водія дає можливість досягнення необхідних параметрів руху ГА.

Розроблені імітаційні моделі компонентів системи керування ГА показали можливість моделювати роботу ГА на різних режимах його руху.

Запропонований спосіб і алгоритм енергетичного контролю дозволяє забезпечити задані режими руху і управління роботою перетворювачів енергії.

Проведені дослідження дозволяють визначати особливості робочих процесів в ГА, перевіряти їх відповідність показникам використовуваних машин в експлуатації та ефективно керувати цими процесами.

#### Список літератури:

1. Сергиенко А.Н. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподрессоренных масс транспортного средства/ Сергиенко А.Н., Любарский Б.Г., Сергиенко Н.Е. // *Сборник научных трудов: Автомобильный транспорт*. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – Вып. 31. – С. 18-25.
2. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton London, New York, Washington, D.C. 2005. 385 p.
3. Thomas J. Böhme, Benjamin Frank. Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles Theory, Methods and Applications. *Springer International Publishing AG* 2017 - 549 p.
4. Chinju Saju, Prawin Angel Michael, T. Jarin Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 52, Part B, August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087>
5. X.D. Xue, K.W.E. Cheng, N.C. Cheung. Selection of electric motor drives for electric vehicles. The Hong Kong Polytechnic University, 2018.
6. Picot N.M. A strategy to blend series and parallel modes of operation in a series\_parallel 2\_by\_2 hybrid diesel // *Electric vehicle*. The University of Akron, 2017. 318 p.
7. Ayers C.W., Hsu J.S., Marlino L.D., Miller C.W. Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system interim report. Oak Ridge National Laboratory, 2004. 35 p.
8. Grunditz E., Jansson E. Modelling and simulation of a hybrid electric vehicle for shell eco\_marathon and an electric go\_kart. Department of energy and environment. Chalmers University of technology, 2019. 137 p.
9. Zhan W., Hasan M., Zoghi B. Requirement development for electrical vehicles using simulation tools. *Proceedings of the world Congress on engineering and computer science*, 2009.
10. Angelika Bosl Einführung in MATLAB/Simulink: Berechnung, Programmierung, Simulation (2020). Carl Hanser Verlag, München, 344 s.
11. Zhang X. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization (Power Systems), Springer, 2011. 360 p.
12. Perez L., Bossio G., Moitre D. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Math Comput Simulat.* – 2006. – № 73. – P. 244-254.
13. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Дваденко В.Я. – Харків: ХНАДУ, 2011. – С. 102–132.
14. Сергиенко Н.Е., Сергиенко А.Н., Любарский Б.Г., Кишкар Н.А. Имитационное моделирование гибридного автомобиля с последовательно-параллельным электроприводом силовой установки с синхронным электродвигателем с постоянными магнитами // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Зб. наук. праць. Тематичний випуск: *Транспортне машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №18. – С. 51-54.
15. Сергиенко Н.Е., Сергиенко А.Н., Любарский Б.Г., Медведев Н.Г., Перевозник А.С., Соболев Е.Ф. Модель тягового электропривода гибридного автомобиля на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 1. – С. 87-91.
16. Сергиенко Н.Е., Сергиенко А.Н., Любарский Б.Г., Медведев Н.Г. Имитационная модель тягового электропривода гибридного автомобиля на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // *Сборник доклады. XXI научно-техническая конференция с международно участие «Транспорт, экология – устойчиво развитие. 14 – 16 май 2015*. Технически университет – Варна катедра «Транспортна техника и технологии». ЕкоВарна, 2015 (Болгария). – С. 405-414.



17. Сергиенко А.Н., Медведев Н.Г. и Любарский Б.Г. Имитационное моделирование автомобиля с асинхронным электродвигателем последовательно-параллельного привода гибридной силовой установки // *Автомобильная промышленность*, 2013, № 9. – С. 20-23.

**References (transliterated):**

1. Sergienko A.N. Analiz konstruksiy elektromekhanicheskikh preobrazovateley i vybor skhemy elektroamortizatora nepodressorenykh mass transportnogo sredstva/ Sergienko A.N., Lyubarskiy B.G., Sergienko N.Ye. // *Sbornik nauchnykh trudov: Avtomobil'nyy transport*. – Khar'kov: KHNADU, 2012. – Vyp. 31. – S. 18-25.
2. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton London, New York, Washington, D.C. 2005. 385 r.
3. Thomas J. Böhme, Benjamin Frank. Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles Theory, Methods and Applications. Springer International Publishing AG 2017 - 549 r.
4. Chinju Saju, Prawin Angel Michael, T. Jarin Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 52, Part B, August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087>
5. X.D. Xue, K.W.E. Cheng, N.C. Cheung. Selection of electric motor drives for electric vehicles. The Hong Kong Polytechnic University, 2018.
6. Picot N.M. A strategy to blend series and parallel modes of operation in a series\_parallel 2\_by\_2 hybrid diesel/Electric vehicle. The University of Akron, 2017. 318 r.
7. Ayers C.W., Hsu J.S., Marlino L.D., Miller C.W. Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system interim report. Oak Ridge National Laboratory, 2004. 35 r.
8. Grunditz E., Jansson E. Modelling and simulation of a hybrid electric vehicle for shell eco\_marathon and an electric go\_kart. Department of energy and environment. Chalmers University of technology, 2019. 137 r.
9. Zhan W., Hasan M., Zoghi B. Requirement development for electrical vehicles using simulation tools. Proceedings of the world Congress on engineering and computer science, 2009.
10. Angelika Bosl Einführung in MATLAB/Simulink: Berechnung, Programmierung, Simulation (2020). Carl Hanser Verlag, München, 344 s.
11. Zhang X. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization (Power Systems), Springer, 2011. 360 p.
12. Perez L., Bossio G., Moitre D. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Math Comput Simulat.* – 2006. – № 73. – R. 244-254.
13. Sinergetichniy avtomobil'. Teoriya i praktika / Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Sêrikov S.A., Dvadenko V.Ya. – Kharkiv: KHNADU, 2011. – S. 102–132.
14. Sergienko N.Ye., Sergienko A.N., Lyubarskiy B.G., Kishkar N.A. Imitatsionnoye modelirovaniye gibridnogo avtomobilya s posledovatel'no-parallelnym elektroprivodom silovoy ustanovki s sinkhronnym elektrodvigatelem s postoyannymi magnitami // *Visnik NTU «KHPÍ»*. Zb. nauk. prats'. Tematichniy vipusk: Transportne mashinobuduvannya. – Kharkiv: NTU «KHPÍ», 2011. – №18. – S. 51-54.
15. Sergienko N.Ye., Sergienko A.N., Lyubarskiy B.G., Medvedev N.G., Perevoznik A.S., Sobolev Ye.F. Model' tyagovogo elektroprivoda gibridnogo avtomobilya na osnove sinkhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkiv: NTU «KHPÍ», 2015. – № 1. – S. 87-91.
16. Sergienko N.Ye., Sergienko A.N., Lyubarskiy B.G., Medvedev N.G. Imitatsionnaya model' tyagovogo elektroprivoda gibridnogo avtomobilya na osnove sinkhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov // *Sbornik dokladi. XXI nauchno-tekhnicheska konferentsiya s mezhdunarodno uchastiye «Transport, yekologiya – ustoychivo rozvitiye*. 14 – 16 may 2015. *Tekhnicheskii universitet – Varna katedra «Transporna tekhnika i tekhnologii»*. YekoVarna, 2015 (Bolgariya). – S. 405-414.
17. Sergienko A.N., Medvedev N.G. i Lyubarskiy B.G. Imitatsionnoye modelirovaniye avtomobilya s asinkhronnym elektrodvigatelem posledovatel'no-parallelnogo privoda gibridnoy silovoy ustanovki // *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2013, № 9. – S. 20-23.

*Надійшла (received) 01.12.2022 р.*



**Сергієнко Микола Єгорович (Sergienko Nikolay)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1924>; e-mail: nesergienko@gmail.com

**Павлова Наталія Миколаївна (Pavlova Nataliya)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0621-1365>; e-mail: nnpavlovann@gmail.com

**Сергієнко Антон Миколайович (Sergienko Anton)** кандидат технічних наук, ТОВ «Інтехресурс», директор; м. Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6067-1672>; e-mail: sergienko2707@gmail.com

**Любарський Борис Григорович (Lyubarsky Boris)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Електричного транспорту та тепловозобудування»; <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>; e-mail: lboris@ukr.net

**Борисенко Анатолій Миколайович (Borysenko Anatoliy)** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри теоретичних основ електротехніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9160-4488>; e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**Калінін Павло Миколайович (Kalinin Pavel)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри інженерної механіки; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9724-0630>; e-mail: pkalining@gmail.com.

**Губський Сергій Олександрович (Gubskiy Sergii)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри "Обробка металів тиском"; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

**Древаль Олександр Миколайович (Dreval Oleksandr)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9843-0521>; e-mail: dreval.alex2017@gmail.com