УДК 004.771: 681.518.22

ПІДХОДИ У МОДЕЛЮВАННІ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

ВАСИЛЕНКО О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: drvasylenkoolga@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6535-3462;

СНІЖНОЙ Г.В. д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: snow@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544;

Мета роботи. *Вибір адекватного програмного забезпечення та розробка методики моделінгу для економічного мультидоменного моделювання системи розподілу та перетворення електроенергії з урахуванням системи керування для сучасних транспортних засобів, зокрема, для гібридного електромобіля із паливним елементом (HEV).*

Методи дослідження*. Основним методом дослідження є математичне моделювання; для структурного синтезу моделі системи перетворення електроенергії та порівняльного аналізу програм використано евристичні методи прийняття рішень на базі порівняння метрик варіантів.*

Отримані результати*. Запропоновано спосіб декомпозиції HEV з точки зору сфери застосування існуючих програм для моделювання його підсистем. Підсистеми з блоків такої структурної схеми придатні для досліджень засобами однодоменних програм моделювання. Показані перспективи програм класу автоматизованого проєктування в електроніці (ECAD) для мультидоменного моделювання HEV, оскільки центральним і основним блоком перетворення є електронний домен. На базі обраних метрик програмного забезпечення обґрунтовано вибір програм для моделювання системи перетворення електроенергії, з можливістю організації модельних інтерфейсів для забезпечення мультидоменного моделювання та забезпеченням коректного експорту-імпорту моделей при переходах між рівнями абстракції. Запропоноване послідовне використання обраних програм автоматизованого інжинірингу (CAE) та ECAD, із переносом інформації про модель та результати симуляції, що здатне забезпечити як оптимальний синтез системи автоматичного керування на базі критерію запасу по фазі із дослідженням зони стійкості по мапі реалізацій, так і глибокий аналіз енергетичних показників силової частини перетворювачів. Для апробації методики обрано паралельну топологію енергетичної системи із блоком суперконденсаторів, перетворювачем підвищувального типу в режимі керування напруги та перспективним чотирьохключовим двонаправленим перетворювачем Buck-Boost в режимі керування струмом. Для підвищення стійкості системи, запропоновано використовувати контролер Type3, який поєднує можливості компенсатора та модулятора.*

Наукова новизна*. Запропоновано новий підхід до моделювання енергетичної підсистеми HEV, який враховує мультидоменність системи та вимагає її розгляду, по-перше, як системи автоматичного керування на макрорівні у CAE-програмі SmartCtrl, із попереднім розширенням її бібліотеки шляхом синтезу передаточних функцій в ECAD-програмі PSIM, та подальшим поверненням на мікрорівень для аналізу енергетичних характеристик і пара-метричної оптимізації перетворювачів разом із системами керування на рівні електричних схем в PSIM. На основі аналізу можливостей програм моделювання компонентів агрегативної системи HEV запропонований варіант структурної схеми моделі енергетичної підсистеми з урахуванням можливостей адекватного застосування «однодоменних» програм та показані перспективи їхнього використання для мультидоменного моделювання HEV. Визначено специфічний набір метрик програм для обґрунтованого вибору програмного забезпечення при дослідженні подібних систем.*

Практична цінність*. Представлена методика послідовного моделінгу енергетичної системи в комплексі програм автоматизованого інжинірингу та автоматизованого проєктування SmartCtrl+PSIM фірми Altair із взаємним обміном даних, забезпечує комплексний аналіз та оптимізацію характеристик цієї підсистеми сучасних транспортних засобів.*

Ключові слова: гібридний автомобіль; система перетворення енергії; мультидоменні системи; програми CAE та ECAD; метрики програм; методика моделінгу; мапа реалізації.

I. ВСТУП

Сучасний транспортні засоби поєднують базові елементи та нові системи, які безперервно змінюються та вдосконалюються. До систем, які значно поширюють функціональні можливості автомобіля, відносяться водневі паливні елементи та суперконденсатори. Паливний елемент виробляє електроенергію, ви-

© Василенко О.В., Сніжной Г.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-4-4

користовуючи хімічну енергію, що утворюється під час взаємодії між воднем і окисною речовиною, зазвичай киснем [1]. До переваг цієї технології слід віднести високу надійність та відсутність шкоди навколишньо-му середовищу, а завдяки своїй масштабованості, паливні елементи можуть використовуватися не тільки для автомобілів, але й для інших транспортних засобів. Гібридні електромобілі (Hybrid Electric Vehicle – HEV) із паливним елементом в якості первинного джерела енергії, є високоперспективними системами, тому виробники вкладають значні кошти в їх дослідження. Наприклад, японська компанія Toyota та німецька BMW вбачають у них найбільш екологічні моделі транспортних засобів наступного покоління і підвищують рівень співпраці в дослідженнях і виробництві.

Однак паливні елементи мають повільну динаміку, що є перепоною їхнього використання для транспорту. Крім того, їхня низька вихідна напруга та нездатність до рекуперації вимагає використання додаткових пристроїв та систем вторинних джерел енергії на транспорті. Такими додатковими пристроями в системі генерації є акумуляторна батарея, або суперконденсатор. Їх додають для прискорення реакції енергетичної системи (наприклад, при прискоренні автомобіля, треба різко підвищити струм якоря двигуна за короткий проміжок часу) та для забезпечення рекуперації енергії під час гальмування.

Система розподілу та утилізації електроенергії має величезний вплив на такі показники якості (метрики) транспортних засобів, як ефективність, вартість, надійність, розмір, запас ходу тощо. В собівартості сучасного автомобіля доля електронних пристроїв доходить до 50 %. З появою нових джерел живлення та різних типів накопичувачів, варіації напруг живлення, підвищення рівня вимог та жорстких стандартів виробництва, оптимальний синтез структури та аналіз параметрів системи розподілу енергії є надзвичайно важливими. Саме тому, задача її моделювання є гостро актуальною. Критично важливим є дослідження характеристик енергетичної системи в динаміці (із врахування обраного профілю споживання енергії) разом із системою керування, отже, таке моделювання має здійснюватися на різних рівнях абстракції.

На перший погляд здається, що задача структурного і параметричного синтезу електронної підсистеми автомобіля є окремою і цілком лежить в межах електронного домену, однак насправді її неможливо розв'язати без інтеграції моделі системи розподілу електроенергії із моделями інших підсистем HEV. Сучасний автомобіль є агрегативною системою, яка поєднує підсистеми різної фізичної природи, що значно ускладнює вибір програмного забезпечення, оскільки більшість програм автоматизованого проєктування орієнтовані на дослідження процесів в певному домені (є однодоменними). Таким чином актуалізується задача пошуку програмного забезпечення для всебічного дослідження енергетичної підсистеми із врахуванням мультидоменності HEV та характеристик системи автоматичного керування.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З точки зору мехатроніки, модель сучасних транспортних засобів утворюється синергетичним поєднанням моделей з трьох доменів: механіки, електроніки та інформаційних технологій [2]. Для визначення можливих шляхів реалізації комплексного моделювання, розглянемо різні способи декомпозиції сучасних транспортних засобів. З огляду на потоки енергії та блоки перетворення, взаємодію підсистем схематично можна представити рисунком 1.

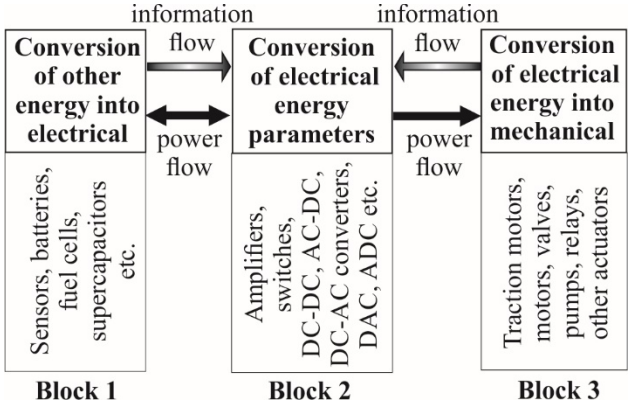

Рисунок 1. Варіант декомпозиції сучасних транспортних засобів

Розбиття на блоки тут виконано за типом перетворення енергії: до першого блоку віднесені сенсори та джерела живлення, які є перетворювачами іншої (хімічної, теплової, механічної тощо) енергії на електричну. До пристроїв та підсистем перетворення параметрів електроенергії (Блок 2) ми віднесли не тільки перетворювачі (такі, як трансформатори, випрямлячі, інвертори та імпульсні регулятори DC-DC), але й системи цифрової електроніки (підсистеми регуляції, контролю, обробки інформації) та аналогової електроніки (підсилювачі, драйвери тощо). Цифроаналогові та аналогово-цифрові перетворювачі також віднесені до центрального блоку. Апаратне забезпечення інформаційних технологій також представлено даним блоком. Таким чином, силова та інформаційна електроніка тут розглядається з огляду на її можливості змінювати параметри електромагнітної енергії.

З «точки зору» програм моделювання електронних пристроїв, перший блок рис. 1 (паливний елемент, суперконденсатор, акумулятор тощо) є генератором електричного сиг-налу. Сигнал може поступати на вхід другого блоку у вигляді потоку (струму), або потенціалу (напруги). Перетворювачі енергії (другий блок рис. 1) узгоджують параметри і характеристики електромагнітної енергії для навантаження. Навантаженням для системи (блок 3) є актуатори – всі пристрої та підсистеми HEV, які виконують переміщення в просторі і описуються (навіть частково) рівняннями

з механічного домену. В режимі рекуперативного гальмування блок 3 стає генератором енергії, потік якої потребує трансформації параметрів в блоці 2 перед зберіганням/рекуперації енергії в блоці 1.

Інформаційні потоки від блоків 1 та 3 – це дані від сенсорів, але в більш широкому розумінні, це може бути інформація від моделей систем Машинного бачення (якщо автомобіль в режимі автопілота), результати моделювання в Digital Twin автомобіля, потоки даних від Smart sensors та аналітика, отримана з Хмарних сервісів.

Аналіз підходів до моделювання HEV

Вибір оптимальної програми для моделювання як підсистем гібридних автомобілів, так і системи в цілому є вкрай важливим. Як при будь-якому виборі, критеріями оптимальності виступають ціна і функціонал (можливості програмного забезпечення). Ціною може бути як грошове представлення, так і час, витрачений на дослідження, зокрема, на узгодження моделей при переході на інший рівень абстракції, або до іншого домену. Для передпроєктних досліджень та для задач постановки віртуальних лабораторних робіт у пов'язаних з даним питанням освітніх компонентах, критерій економічності виходить на перше місце.

Програми моделювання поділяються за призначенням і, як слідство, відрізняються апаратом симуляції (солверами). Нижче використані абревіатури для таких основних математичних процесорів: Автоматизоване проєктування в електроніці (Electronics Computer-aided design, ECAD), автоматизований інжиніринг (Computer-aided Engineering, CAE), САПР машинобудування (Mechanical Engineering CAD, MCAD), також відоме як автоматизація механічного проектування (MDA). Системи комп'ютерної алгебри (Computer Algebra System, CAS), це фактично універсальні математичні процесори, які мають бібліотеки як моделей підсистем та елементів різної фізичної природи для їхнього моделінгу (етапу побудови моделі), так і відповідні бібліотеки солверів для їхньої симуляції (етапу розв'язання рівнянь).

Підхід до симуляції може бути каузальним, або акаузальним [3]. Каузальний підхід властивий більшості CAE (оскільки вони призначені для дослідження систем автоматичного керування на високому рівні абстракції), акаузальний – системам CAD, де симуляція здійснюється шляхом розв'язання систем алгебро-диференціальних рівнянь, що описують фізичні явища в межах одного домену на низькому рівні абстракції. CAS може поєднувати обидва підходи, оскільки забезпечує симуляцію на різних рівнях абстракції, в тому числі для інформаційних систем, а отже, забезпечує мультидоменне моделювання.

Гарним прикладом програм для мультидоменного моделювання є такі, що дозволяють створити цифрового двійника (Digital Twin) транспортного засобу, наприклад Simulink® [4]. При цьому модель може адресуватися до підсистем, які є реальними пристроями, підключеними до портів комп'ютера. За допомогою інтерфейсів і протоколів зв'язку створюється відповідно середовище моделювання. Такій підхід дозволяє розробити високоточні моделі електродвигунів, паливних елементів, багатокорпусних підвісок або систем охолодження за допомогою Simscape® [5]. HEV в Simscape® моделюється як агрегативна мультидоменна система із підключенням реальних пристроїв за технологію HiL [6]. Однак, це висуває жорсткі вимоги до розподілення обчислень та обсягів пам'яті для зберігання результатів симуляції, вимагає використання Хмарних технологій. Вартість таких програм вимірюється десятками тисяч доларів.

Але існують і економічні (в плані вартості програм і часу, витраченого на моделінг) «однодоменні» програми, які можуть бути придатними для моделювання системи розподілу електроенергії HEV, що, однак, потребує розробки відповідного методичного і математичного забезпечення. З огляду на призначення та можливості (математичний апарат) таких програм моделювання, систему HEV варто розбити на такі структурні блоки (рис. 2).

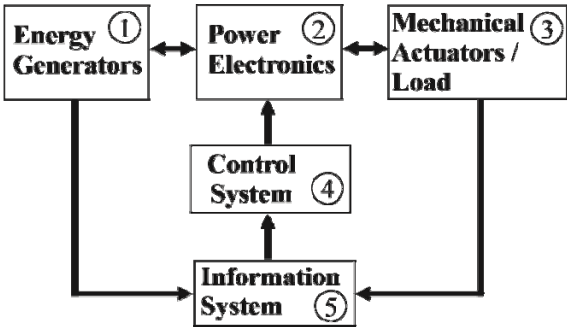

Рисунок 2. Структурні блоки HEV з огляду на специфіку програм моделювання

Розглянемо задачі та програми моделювання для цих блоків для формування критеріїв їхньої придатності у розв'язанні поставлених задач комплексного моделювання системи розподілу енергії в транспортних засобах.

1. Підсистема генераторів електроенергії, моделюються в CAS, або у відповідних однодоменних CAD. Задача дослідження – оптимізація внутрішніх та зовнішніх метрик паливних елементів, акумуляторів та суперконденсаторів.

Моделювання генераторів електроенергії може мати на меті оптимізацію внутрішніх параметрів, наприклад при дослідженні характеру і ефективності хімічних реакцій при зміні умов процесу, або оптимізацію зовнішніх параметрів (струм, опір), що вимагає мультидоменного моделювання (наприклад, в структурах генератор енергії + система заряду-розряду). Відповідно, відрізняються і засоби моделювання.

Наприклад, програма SimScale, як платформа розробки програмного забезпечення для хмарного

моделювання, використовується для гідродинамічного моделювання (Computational Fluid Dynamics, CFD) і термічного аналізу (Thermal Analysis) елементів гене-рації електроенергії. Наприклад, для оптимізації структур паливних елементів програма SimScale використовує аналіз на базі кінцевих елементів (Finite Element Analysis, FEA). Це дозволяє симулювати та оптимізувати конструкції водневих паливних елементів, мінімізуючи потребу у дорогих фізичних прототипах та отримати уявлення про конструкцію та роботу паливних елементів, у тому числі про те, як різні робочі та екологічні параметри впливають на продуктивність [7]. В [8] показані результати дослідження термодинаміки паливного елементу, зокрема, потоку теплової енергії із ціллю покращення температурного менеджменту системи генерації. У [9] наведено модель суперконденсатора та показані результати симуляції під час його заряду та розряду. Модельний експеримент був відтворений в середовищі програми LabVIEW 2016. Симуляція в [8, 9] здійснювалася на платформі MATLAB, який можна віднести до класу CAS, висока функціональність та універсальність яких поєднується із високою вартістю.

Ansys Motor-CAD [10] це спеціалізована програма для проєктування та моделювання систем генерації електроенергії, зокрема, для електродвигунів, для тривимірного моделювання акумуляторних батарей, що надає можливість вдосконалювати конструкції, збалансовуючи безпеку, продуктивність, розмір, вартість і надійність. Висока вартість Ansys пояснюється тим, що система поєднує в собі програми класу CAE та CAD, із можливістю передачі інформації у власну систему CAM (Computer-aided manufacturing), використовує як мультидоменний підхід, так безбар'єрний транзит даних між програмами інжинірингу та проєктування, тобто між моделями макрорівня та мікрорівня (реалізовано мультирівневість).

2. Підсистема силової електроніки (блок 2 на рис. 2), моделюється в на мікрорівні в ECAD. Задача моделювання – дослідження фазових змінних для оптимізації параметрів пристроїв силової електроніки.

Перетворювачі, підсилювачі, драйвери та електропривод моделюються в ECAD на рівні електричних схем, елементами на етапі збирання моделі в редакторі схем (моделінг) є зосереджені елементи (резистори, транзистори, реактивні елементи тощо), а математичною базою для етапу симуляції є методи розв'язання нелінійних неоднорідних алгебраїчно-диференційних рівнянь [12]. Елементи системи генерації (блок 1 рис. 2) емулюються зосередженими моделями (джерелами електричного сигналу), при цьому симулятор програми електронного домену оперує тільки такими їхніми «зовнішніми» функціями та параметрами, як фазові змінні (напруга, струм, потужність) і вимагає попереднього визначення модельних інтерфейсів (активних і реактивних вхідних та вихідних опорів).

Моделі основних перетворювачів електроенергії є в ECAD програмах, зокрема в PSIM [12]. Моделі інших перетворювачів можна побудувати на базі моделей елементів силової електроніки з їх бібліотек. Деякі економічні ECAD програми (наприклад, Micro Cap12) дозволяють створювати нові моделі і дають можливість оцінювати потужність, температурні залежності, вартість і навіть розмір елементу. Якщо ECAD є складовою CADAM (computer-augmented design and manufacturing), ці дані передаються для розводки друкованих плат, на верстати, та в цифрові платформи, наприклад ERP (Enterprise resource planning) цифрового виробництва [13].

Енергетична система автомобіля працює в режимі постійних перехідних процесів. Широкі можливості для дослідження і оптимізації підсистем HEV відкриваються, коли враховується зміна споживаної потужності відповідно до обраного циклу руху [14, 15]. Наприклад, в міському циклі профіль витрат енергії змінюється дуже швидко, тому моделювати її без контролюючої системи та із статичним навантаженням немає сенсу. Під час моделінгу в ECAD такий підхід можна реалізувати через варійований за заданим законом поведінковий елемент (наприклад нелінійний програмований резистор), що є предметом наших подальших досліджень. В заміському циклі, коли машина рухається довго із постійною швидкістю, це можна умовно прийняти за стаціонарний режим роботи системи автоматичного керування перетворювачем (САК).

3. Механічна частина (Блок 3 на рис. 2), моделюється в MCAD та в CAS. Для аналізу характеристик транспортних засобів, до цього домену варто включити всі об'єкти, які здійснюють будь-яке переміщення в просторі і потребують керування, яке для мехатронних систем є інтелектуальним. Структура електроприводу залежить від обраного типу тягового двигуна і впливає на вибір топології систем перетворення енергії. Ця підсистема також є мультидоменною, оскільки має узгоджувати механічні характеристики двигуна із електричними характеристиками пристроїв електронного домену і навпаки.

Існують програми, спеціально орієнтовані для моделювання, імітації, візуалізації та тестування механічних підсистем автомобіля та автомобіля в цілому. Деякі з них дозволяють дослідити поведінку автомобіля в динаміці в різних умовах (Engineering, Driving Simulators & Game Development); або для моделювання роботи окремих компонентів транспортного засобу, наприклад систем допомоги водієві (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) або функцій автономного водіння.

Механічні підсистеми транспортних засобів традиційно моделюються в MCAD, де можуть використовуватися як моделі із розподіленими параметрами, що потребує розв'язання системи рівнянь із приватними похідними на етапі симуляції, так і моделі із зосередженими параметрами; і тоді використовується математичний апарат, схожий із таким в ECAD. Це відкриває можливості спільного моделювання меха-

нічного та електронного домену в ECAD на базі розв'язання нелінійних диференційних рівнянь в повних похідних [16].

4. Control system (Блок 4 рис. 2), моделюється на макрорівні в CAE та в CAS. Задача дослідження – оптимізація структури та параметрів контролюючих систем із ціллю підвищення стійкості всієї системи.

Багаторівневі адаптивні системи автоматичного керування з кількома зворотними зв'язками пронизують і охоплюють всю систему сучасного автомобіля і мають настільки високий рівень складності та мультизадачності, що потребують багатопроцесорного керування та регуляторів з домену цифрової електроніки. Ми пропонуємо досліджувати HEV на верхньому рівні абстракції як багатоконтурну САК і моделювати її в CAE за допомогою блок-схем, використовуючи каузальний підхід [17], при цьому необхідно забезпечити без'барєрну передачу даних від CAE до ECAD для динамічного моделювання силової ступені системи розподілу енергії.

CAE мають бібліотеки стандартних блоків систем автоматичного керування (інтегратори, суматори, блоки затримки тощо) та підсистеми для автоматичного синтезу модуляторів, компенсаторів і фільтрів. Таким чином, CAE мають значні переваги для комплексного моделювання HEV як автоматизованої системи. Деякі контури систем керування можуть бути спроєктовані на базі аналогової мікроелектроніки, зокрема для перетворювачів і складатися з ШІМ-контролерів, компенсаторів тощо і потребувати додаткового моделювання на мікрорівні, що вимагає розробки механізму імпорту-експорту моделей для переходу між CAE та CAD.

5. Системи інформаційної електроніки (блок 5 на рис.2) моделюються в CAS та CAE на верхніх рівнях абстракції, де елементами для моделінгу виступають блок-схеми, нейронні мережі, ланцюги Петрі, графи тощо. Засоби та методи для симуляції (етапу розв'язання задачі) також специфічні, наприклад, оптимізація матриці ваг нейронних мереж, дискретна математика. До цього блоку входять також інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) покоління 4.0 (на базі розумних сенсорів) та підсистеми інтелектуальної системи керування. ІВС має в якості входів датчики (струму, напруги, тиску, температури тощо) та входить в склад САК та кібер-фізичних систем Індустрії 4.0, наприклад із розгортанням моделей Машинного навчання для керування. В останньому випадку, задачами ІВС 4.0 є не тільки вимірювання та перетворення даних на інформацію, підготовка для передачі в контролюючу підсистему [18], але й розв'язання суто «інтелектуальних» задач, на-приклад, підтримки людино-машинного інтерфейсу, прийняття рішень, прогнозного обслуговування тощо.

III. МЕТА РОБОТИ

Проєктування оптимальної системи розподілу електроенергії в HEV є ітераційним процесом, який передбачає аналіз і оцінку таких критеріїв якості системи як: ефективність, надійність, складність тощо. Важливо оцінити потужність силової ступені перетворювачів та керованість і стійкість системи в цілому. Як це випливає з вищенаведеного аналізу, існуючі підходи та доступні за ціною програми не дають можливості оцінити всі метрики одразу (фазові змінні, стійкість, термічні характеристики тощо). Програми, які надають такі можливості, або надто дорогі для більшості вчених з академічної спільноти України, або слугують тільки для внутрішніх потреб певних виробників і є об'єктами промислової таємниці.

В той же час, передпроєктні наукові дослідження в галузі структурного та параметричного синтезу енергетичної підсистеми HEV, зокрема заради впровадження результатів досліджень у навчальний процес, потребують простих і доступних, але при цьому універсальних інструментів моделювання. Тому, задача вибору доступного програмного забезпечення для комплексного дослідження систем перетворення енергії в мультидоменній системі сучасних транспортних засобів є актуальною задачею. Метою даної роботи є визначення такого програмного забезпечення та розробка методики розробки моделей (моделінгу) для досліджень системи розподілу електроенергії як систем автоматичного керування (на макрорівні), так для аналізу енергетичних характеристик електричних схем силової частини цієї підсистеми на мікрорівні.

IV. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУЧАСНИХ ТРАНСПОРНИХ ЗАСОБАХ

Оскільки при комплексному моделюванні системи перетворення електроенергії необхідно враховувати мультидоменність HEV, найбільш очевидним вибором для дослідження системних метрик буде CAE. Однак, більшість задач дослідження енергетичних характеристик мехатронної системи зручно виконувати в ECAD, оскільки електрична енергія є проміжною формою в обміні енергією між доменами (рис. 1). Це вимагає побудови таких моделей підсистем з першого та третього блоків рис. 1, які мають інтерфейси із параметрів з електрон-ного домен, тобто можуть взаємодіяти із електронним доменом через струми та напруги. Сучасні ECAD придатні також і до мультидоменного моделювання, якщо закласти в модель формули з потрібних доменів і перевизначити імена на «електричні» (струми, напруги і так далі). Математична база в сучасних ECAD розширена можливостями програмування і самостійного визначення нових функцій, що дає широкі можливості для розробки емпіричних моделей для будь-якого домену.

З точки зору математичного процесора ECAD, актуатори є навантаженням: пасивним, яке моделюється RLC-компонентами, або активним. Для моде-

лювання рекуперативних процесів додаються керовані джерела струму. Крутний момент, швидкість, частота обертів та інші «неелектричні» функції та параметри в таких моделях емулюються через струми та напруги, оскільки це є специфіка даного типу програмного забезпечення. Наприклад, в Micro-Cap 12 наведені моделі двигунів змінного, постійного струму та крокового мотора, які побудовані повністю із використанням бібліотеки електронного домену. Це дозволяє досліджувати навантажений електропривод і оптимізувати його параметри. Мультидоменний підхід використаний також в ECAD програмі HEV Design Suite від PSIM, що дозволяє досліджувати системи трансмісії разом із синтезом систем керування.

Отже, спільне моделювання всіх трьох блоків рис. 1 можливе в ECAD, якщо розроблені моделі всіх блоків мають «електричний» набір параметрів, або в програмах CAE, якщо поставлена задача дослідження HEV як автоматизованої системи і визначені передаточні функції (наприклад, з використанням перетворення Лапласа) блоків, що складають САК. Можливе також спільне використання програм обох класів, якщо необхідно дослідити енергетичні характеристики з урахуванням контролюючої системи. Саме такий підхід запропонований авторами, для застосування якого розроблена відповідна методика.

Авторами були проведені експерименти з моделювання підсистем HEV в різних програмах CAE та ECAD. Серед розмаїття ECAD програм були обрані MicroCap 12 та PSIM, оскільки їхні бібліотеки моделей містять готові блоки для формування моделей перетворювачів, а їхні солвери орієнтовані на специфіку моделей пристроїв силової електроніки (жорсткі, погано обумовлені не-однорідні нелінійні диференційні рівняння).

Для дослідження енергетичної системи як автоматизованої системи, були обрані програми 20-sim та SmartCtrl, як такі, які демонструють абсолютно різний підхід до моделінгу. Наприклад, модель в 20-sim може включати блоки, отримані з бібліотек Bond-графів, нейронних мереж, схем заміщення пристроїв з різних доменів і блок-схем із передаточними функціями по Лапласу. Область застосування – моделювання мультидоменних систем на високому рівні абстракції. Є спеціальні інструменти по синтезу PID контролерів. Натомість, SmartCtrl це фактично спеціалізована програма по оптимальному синтезу систем керування перетворювачами електроенергії.

Огляд, представлений в першому розділі даної публікації, дозволив сформувати набір параметрів, які можна назвати специфічними метриками програм, які визначають ступінь їхньої придатності для поставлених задач комплексного мультидоменного моделювання силової ступені та системи керування в системі розподілення енергії в сучасних транспортних засобах. Аналіз метрик дозволяє прийняти оптимальні рішення щодо вибору програмного забезпечення.

Визначені метрики обраних програм наведені в Табл. 1. Для оцінки якості був використаний бінарний підхід. Мінус тут означає слабкість, або відсутність, символ +/– означає, що для реалізації цієї функції треба докласти певних зусиль, три плюса означає надзвичайно високий рівень показника.

Таблиця 1. Метрики якості програм для моделювання HEV

Метрики якості	ECAD		CAE	
	MicroCap 12	PSIM	SmartCtrl	20-sim
Метрики економічності та функціональності				
Наявність безкоштовної версії	+	+	+/–	+/–
Відсутність алгоритмічних збоїв	–	+	+	+
Підтримка мультидоменності	+	–	+	+++
Програмування нових функцій	+++	+	–	+
Підхід в симуляції	каузальний	каузальний	акаузальний	акаузальний
Якість симуляції				
Швидкість симуляції	–	+++	+	+/–
Точність симуляції	+++	+/–	+	+
Кількість доступних солверів	3	1	2	10
Кількість методів оптимізації	2	0	1	0
Принцип побудови моделей				
Метод блок схем (Block Diagram)	+	+	+	+
Графи зв'язку (BondGraph)	–	–	–	+

Схеми заміщення (Iconic Diagrams)	+	+	–	+
Рівняння	+	+/–	–	+
Спеціалізовані інструменти для дослідження систем автоматизації				
Аналіз стійкості	+	–	+	+/–
Карта нулів і полюсів	+	–	+	–
Годограф Найквіста	+	–	+	–
Мапа діапазону стійкості	–	–	+	–
Синтез регуляторів і фільтрів	+/–	–	+	+
Можливість безбар'єрного трансферу даних між рівнями абстракції та програмами				
Зв'язок із іншими програмами	Spice	SmartCtrl, MATLAB	PSIM, MATLAB	MATLAB
Мультирівневість	+	–	–	+++

В поставлених задачах дослідження, MicroCap продемонстрував проблеми із швидкістю симуляції, але має і переваги, оскільки володіє широкими можливостями як для дослідження силової ступені, так і для аналізу стійкості системи, допускаючи формування моделі із підсистемами різного рівня абстракції (мультирівневість), із можливістю синтезу нових функцій, як в домені часу, так і в домені комплексної частоти. Однак, при зростанні розмірності моделі, виникають алгоритмічні збої, які повністю нівелюють її переваги для комплексного моделювання складних систем.

20-sim є просунутою програмою інжинірингу та дизайну із бібліотеками моделей з електричного, механічного, гідравлічного доменів і домену термодинаміки. Для поставлених задач вона демонструє свої найліпші якості в галузі автоматичного синтезу регуляторів та лінійних систем. Однак, безкоштовна версія програми не дозволяє зберігати проєкт, що тим не менш, не робить її непридатною для використання в учбовому процесі для дослідження сучасних транспортних засобів, робототехнічних та мехатронних комплексів.

З першого погляду здається, що PSIM має занадто багато мінусів, але головна перевага цієї ECAD – це надзвичайна висока швидкість симуляції та можливість інтеграції із CAE-програмою SmartCtrl, якщо необхідно дослідити енергетичні характеристики з урахуванням контролюючої системи. Обидві програми входять до Altair Group і дозволяють імпортувати/експортувати результати симуляції та інформацію про модель одна до іншої. В досить простій програмі SmartCtrl [19] можна налаштувати вимоги до керування з точки зору стабільності та запасу стійкості системи (моделювання на високому рівні абстракції) та передати інформацію для спільного моделювання в PSIM на рівні схем. SmartCtrl не є універсальною програмою інжинірингу, її специфіка – це системи керування перетворювачами, але ця програма має унікальні інструменти для дослідження зони стійкості та надає детальну інформацію про розроблені компенсатори в трактах керування конвертерами.

Методика моделінгу енергетичних систем HEV в програмах CAE+ECAD групи Altair

Розглянемо етапи моделінгу (тобто розробки моделі) енергетичної системи HEV. Моделінг має кілька стадій: структурний синтез та параметричний синтез моделі, адаптація моделі для обраного програмного забезпечення та імплементація (розгортання) моделі (підготовка до симуляції).

1. Структурний синтез моделі. Якість HEV значною мірою визначається топологією та параметрами компонентів енергетичної системи. Оскільки паралельна топологія є компромісною з огляду складності та ефективності, для розробки методики моделювання ми для досліджень використали варіант паралельної топології HEV із сетом суперконденсаторів та паливного елементу, наведений на рис. 3, провівши структурний синтез, виходячи з критеріїв оптимальності енергоспоживання системи [20].

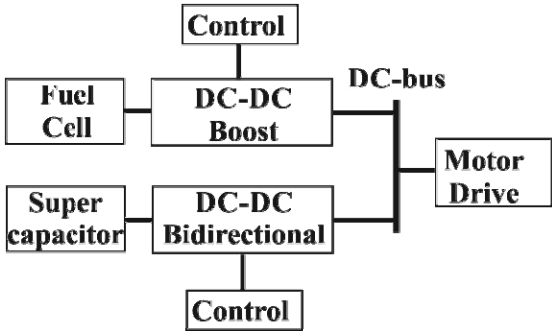

Рисунок 3. Варіант паралельної топології HEV

2. Параметричний синтез моделі. На цьому етапі для блоків обраної топології обираються відповідні пристрої. Для керування паливним елементом обрано підвищувальний перетворювач (Boost converter) з регулюванням напруги, який з'єднує блок паливних елементів (Блок Fuel Cell) з ланкою постійного струму (DC-bus).

Сет суперконденсаторів забезпечує покращення динаміки споживаної потужності та забезпечує рекуперацію. Для керування потоком енергії від суперко-

нденсаторів пропонуємо використовувати перспективний двонаправлений DC-DC перетворювач з чотирма електронними ключами (Four-switch Buck-Boost converter, FSBB), який працює в режимі контролю струму (Current Mode), що у порівнянні з традиційним керуванням напругою, забезпечує менші коливання вихідної напруги та більш високу надійність завдяки швидкому вимірюванню струму для захисту від короткого замикання та перевантаження на виході. Перетворювач FSBB має тільки один дросель (що мінімізує його розміри та вартість) та може працювати в трьох режимах роботи (Buck, Boost, Buck-Boost), що є пріоритетом при його виборі, в зв'язку з широким діапазоном зміни вхідної напруги [21].

3. Адаптація моделі. Як було зазначено вище, ми пропонуємо на верхньому рівні абстракції представляти систему перетворення електроенергії як САК, що в свою чергу вимагає використання програм CAE. Наш вибір – програма SmartCtrl [19], яка дозволяє проєктувати систему керування незалежно від фізики її підсистем.

Енергетична система HEV в стандартних термінах Теорії автоматичного керування має вигляд, наведений на рис. 4. Щоб спроєктувати систему керування в SmartCtrl, необхідно визначити передавальні функції (по Лапласу) всіх блоків цієї структурної моделі: перетворювача/Plant $G_{VD}(s)$, датчика/Sensor H(s), компенсатора/Compensatot R(s) та модулятора/Modulator M(s). Якщо вони відсутні в бібліотеці SmartCtrl, їх можна або імпортувати з PSIM, або ввести «вручну».

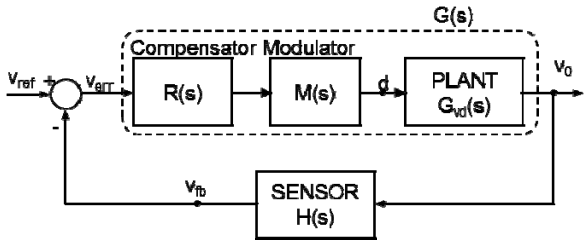

Рисунок 4. Енергетична система як система автоматичного керування в SmartCtrl

4. Імплементація моделі. Бібліотека SmartCtrl містить топології основних типів конвертерів, зокрема Boost, однак передаточну функцію $G_{VD}(S)$ для FSBB конвертера необхідно попередньо отримати в ECAD програмі PSIM [12]. Отримана передаточна функція далі експортується в SmartCtrl (для блоку Plant на рис. 4) і далі послідовно в спеціальних вікнах програми обираються сенсор, компенсатор та модулятор, а їхні передаточні функції автоматично підключаються до спільної системи рівнянь моделі для подальшого розв'язання в домені комплексної частоти. Ми обрали дільник напруги в якості сенсора та повністю аналоговий контролер Type3, який поєднує в собі модулятор (PWM) та компенсатор, що найкращим чином забезпечує підвищення стійкості САК.

Під час синтезу компенсатора для FSBB була створена «Мапа рішення» (Solution Map), що є унікальною особливістю SmartCtrl, яка дозволяє дослідити зону стабільності і відповідно до її параметрів синтезувати оптимальний регулятор. Верхня межа білої зони на рис. 5 визначаються максимальним запасом фази (Phase Margin, phase boost) [22], якого можна досягти за допомогою вибраного компенсатора на частоті, де Амплітудно-частотна характеристика (Bode Graph) падає до 0дБ (Crossover frequency). Нижня частина дійсної області відповідає інтегратору, який просто додає 90^0 до фази передаточної функції системи без регулятора. Для обраної схеми дослідження запас по фазі на частоті Crossover в 7кГц є 45^0, тому система є стійкою.

Результатом параметричного синтезу в CAE є їхні оптимальні та стійкі системи керування. Потім результати (синтезовані системи керування) експортуються до PSIM, де виконується спільна симуляція всієї системи, при чому елементи системи генерації емулюються через джерела постійного струму.

Симуляція в програмі PSIM в тисячі разів швидше, ніж в більшості ECAD, що було для нас вагомим чинником при її виборі, оскільки повна модель системи досить жорстка (маю суттєву різницю між постійними часу підсистем τ) і має велику розмірність (багато елементів = багато рівнянь). PSIM дозволяє дослідити не тільки дисипативні властивості системи, але й температурні режими елементів з електронного домену. Опосередковано можна оптимізувати і параметри системи генерації енергії, визначити розмір основного джерела живлення (паливного елементу) і допоміжних джерел живлення.

V. ВИСНОВКИ

Аналіз підходів і засобів моделювання сучасних транспортних засобів, зокрема HEV, як агрегативних систем, дозволив сформувати критерії (набір специфічних метрик) для вибору адекватного програмного забезпечення та для прийняття оптимальних рішень на етапі формування математичного забезпечення проєктування, зокрема для задач передпроєктних досліджень та в навчальному процесі.

Для економічного дослідження енергетичної системи сучасних транспортних засобів, пропонується розглядати пристрій гібридного автомобіля як комплекс систем автоматичного керування із центральною роллю електронних перетворювачів, що визначило принцип його декомпозиції та вибір відповідних програм класу CAE та ECAD для моделювання. Сформована методика для дослідження енергетичної системи HEV в комплексі ECAD програми PSIM та CAE програми SmartCtrl дозволяє поєднати можливості синтезу оптимальної системи контролю із аналізом силової ступені перетворювачів. Головними критеріями для вибору програми SmartCtrl були безбар'єрний трансфер даних між нею та PSIM та її надзвичайно широкі можливості дослідження зони стійкості

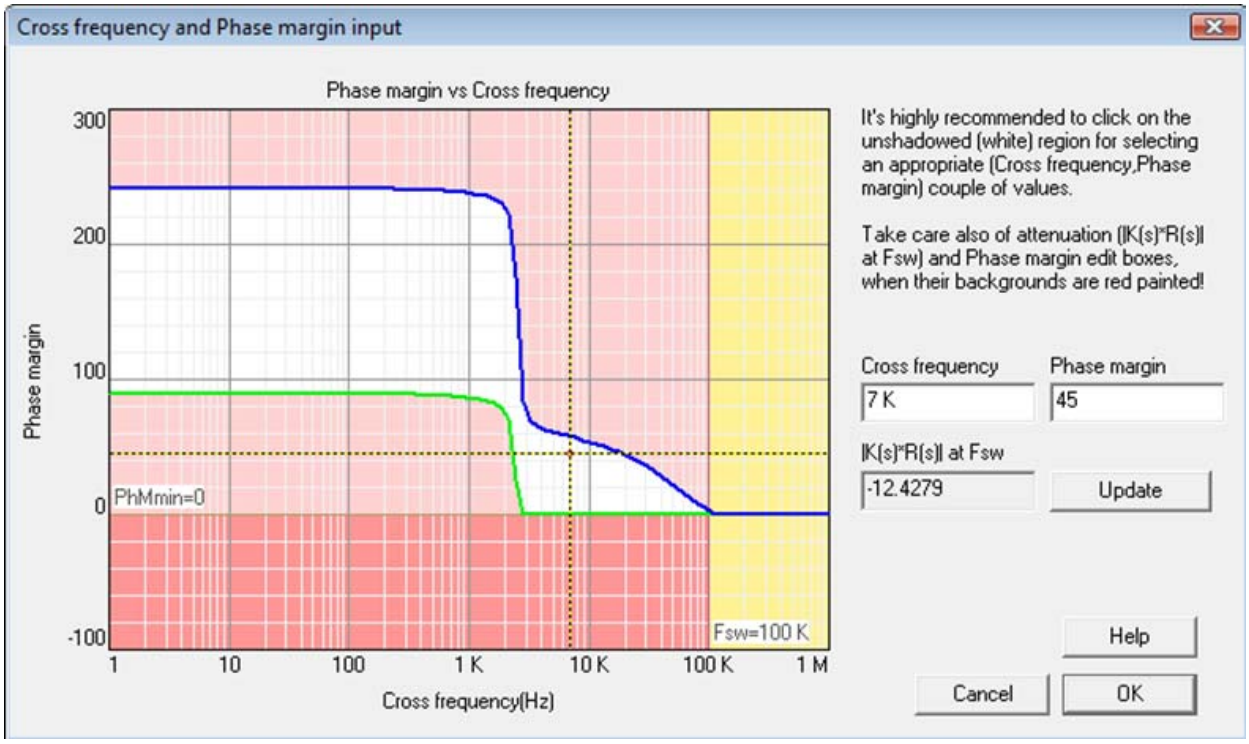

Рисунок 5. Карта рішення для дослідження зони стійкості FSBB в SmartCtrl

систем керування перетворювачами.

Під час апробації розробленої методики моделінгу з'ясувалося, що при комплексному дослідженні моделі енергетичної системи із системою керування, SPICE-сумісні ECAD програми демонструють погану збіжність та інші алгоритмічні збої, що можна усунути зменшенням кроку інтегрування і зменшенням жорсткості моделі, але це або катастрофічно збільшує час симуляції, або призводить до втрати адекватності. Натомість, програма PSIM, використовуючи максимально можливу лінеаризацію вихідної моделі, демонструє в подібних задачах надзвичайно високу швидкість симуляції. І хоча PSIM не володіє мультидоменністю бібліотек, як MicroCap12, або 20-sim, вона здатна генерувати та експортувати передаточні функції перетворювачів, придатні для розширення бібліотеки SmartCtrl та імплементувати синтезовані в SmartCtrl оптимальні системи керування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Felseghi R.A. Hydrogen fuel technology for the sustainable future of stationary applications / R.A. Felseghi, E. Carcadea, M.S. Raboaca // Energies. – 2019. – Vol. 12, no. 3:4593. doi: 10.3390/en12234593.

[2] Kuru K. Transformation to advanced mechatronics systems within new industrial revolution: a novel framework in automation of everything (AoE) / K. Kuru, H. Yetgin // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 41395–41415. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907809.

[3] Василенко О.В. Аналіз програм моделювання мехатронних систем / О.В. Василенко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – № 3. – С. 80–87. doi: 10.15588/1607-3274-2015-3-10.

[4] Minh V.T. Optimal fuel consumption modelling, simulation,and analysis for hybrid electric vehicles / V.T. Minh, R. Moezzi, J. Cyrus, J. Hlava // Appl. Syst. Innov. – 2022. – Vol. 5, no. 2:36. doi: 10.3390/asi5020036.

[5] Tudoroiu R.E. SOC estimation of a rechargeable li-ion battery used in fuel-cell hybrid electric vehicles-comparative study of accuracy and robustness performance based on statistical criteria. Part I: Equivalent models / R.E. Tudoroiu, M. Zaheeruddin, N. Tudoroiu, S. Radu // Batteries. – 2020. – Vol. 6, no. 3:42. doi: 10.3390/batteries6030042.

[6] Amal S. HiL simulation and controller prototyping of EV/HEV systems using multi-core xEV Real time simulator / S. Amal, V. Vishnu, R.V. Chacko, S. Ghugal, P. Mengaji, U. Karle // IEEE Transportation Electrification Conference, [Pune], 12 jan. 2017. / ITEC-India. – Pune, 2019. – P. 1–5. doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8333892.

[7] Felseghi R.A. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications / R.A. Felseghi, E. Carcadea, M. Raboaca, C. Trufin, C. Filote // Energies. – 2019. – Vol. 12, no. 23:4593. doi: 10.3390/en12234593.

[8] Afshari E. Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field / E. Afshari // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. – Vol. 139, no. 4. – P. 2423–2434. doi: 10.1007/s10973-019-08354-x.

[9] Castiglia V. Modelling, simulation and characterization of a supercapacitor / V. Castiglia, N. Campagna, C. Spataro, C. Nevoloso, F. Viola, R. Miceli // 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference, [Palermo], 15 jul. 2020. / MELECON. – Palermo, 2020. – P. 46–51. doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140474.

[10] Majeed A. Ansys software for mechanical engineering / A. Majeed // Manav Rachna International University. 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.18076.97927.

[11] Василенко О.В. Підвищення якості моделювання динамічних систем вибором оптимальних алгоритмів симуляції / О. В. Василенко, Я.І. Петренко// // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 4. – С. 11–18.

[12] Alonso A. A guideline for employing PSIM on power converter applications: Prototyping and educational tool / A. Alonso, F. Marafao, D. Brandao, E. Tedeschi, J. Guerreiro // Conference: Brazilian Power Electronics Conference, 19–22 nov. 2017. / COBEP. – 2017. – P. 1–6. doi: 10.1109/COBEP.2017.8257284.

[13] Василенко О.В. Менеджмент цифрового виробництва : монографія / О.В. Василенко, Г.В. Сніжной, Ю.С. Ямненко ; Нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя : НУЗП, 2022. – 120 с.

[14] Gaoua Y. Hybrid systems energy management using optimization method based on dynamic sources models / Y. Gaoua, S. Caux, P. Lopez, C. Raga, A. Barrado, A. Lazaro // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, [Coimbra], 27–30 oct. 2014. / VPPC. – Coimbra, Portugal, 2014. – P. 1–10. doi: 10.1109/VPPC.2014.7007079.

[15] Василенко О.В. Концепція моделювання електромобілів для оптимізації запасу ходу в різних патернах руху / О.В. Василенко, Г.В. Сніжной, С.А. Івченко // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф., [Дніпро], 1–3 лист. 2023 р. / УДХТУ. – Дніпро, 2023. – С. 155–156.

[16] Stjepandic J. Standardized approach to ECAD/MCAD collaboration / J. Stjepandic, C. Emmer, A. Fröhlich, V. Jäkel // Journal of Aerospace Operations. – 2014. – Vol. 3, no.3, 4. – P. 587–596. doi: 10.3233/978-1-61499-440-4-587.

[17] Василенко О.В. Вибір методу оптимізації систем автоматичного керування в системах автоматизованого інжинірингу / О.В. Василенко, Я.І. Петренко // Енергетика і автоматика. – 2017. – № 1. – С. 75–89.

[18] Vasylenko O. Design of information and measurement systems within the Industry 4.0 paradigm / O. Vasylenko, S. Ivchenko, H. Snizhnoi // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. – no. 1. – P. 45–54. doi: 10.32620/reks.2023.1.04.

[19] Fernández H. Aplicando el smart controller del PSIM / H. Fernández // Commodities. – 2015. – P. 1–12. doi: 10.13140/RG.2.1.3452.8087

[20] Raga A. Anocíbar, José F. Sierra Analysis and Comparison of Four Regenerative Power Distribution Architectures Based on Fuel Cell / A. Raga, I. Barrado, A. Quesada, C. Lázaro // Supercapacitors and Batteries 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, [Orlando], 10–13 nov. 2008. / IECON. – Orlando (USA), 2008. – P. 545–550. doi: 10.1109/IECON.2008.4758012.

[21] Ravi D. Bidirectional DC to DC converters: An overview of various topologies, switching schemes and control techniques / D. Ravi, M. Reddy, S. Letha, P. Samuel // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7. – P. 360-365. doi: 10.14419/ijet.v7i4.5.20107.

[22] Quenzer-Hohmuth S. Challenges and implementation aspects of switched-mode power supplies with digital control for automotive applications / S. Quenzer-Hohmuth, T. Rosahl, S. Ritzmann, B. Wicht // Advances in Radio Science. – 2016. – Vol. 14. – P. 85-90. doi: 10.5194/ars-14-85-2016.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2024

APPROACHES IN MODELING ELECTRICAL ENERGY CONVERSION SYSTEMS IN HYBRID VEHICLES

VASYLENKO O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of information security and nanoelectronics of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: drvasylenkoolga@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6535-3462;

SNIZHNOI G.V. Sci.D, Professor, Professor of the department of information security and nanoelectronics of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: snow@zp.edu.ua. ORCID: 0000-0003-1452-0544;

Purpose. *Selection of adequate software and development of a modeling methodology for economical multi-domain simulation of the power distribution and conversion system, taking into account the control system for modern vehicles, in particular, for a hybrid electric vehicle with a fuel cell (HEV).*

Methodology. *The main method of research is mathematical modeling; heuristic decision-making methods based on the comparison of option metrics are used for the structural synthesis of the model of the power conversion system and comparative analysis of programs.*

Findings. *A method of decomposition of HEV in terms of the scope of existing programs for modeling its subsystems is proposed. Subsystems made up of blocks of such a structural scheme are suitable for research using single-domain modeling programs. The prospects of electronics computer-aided design (ECAD) programs for multi-domain modeling of HEVs are shown, since the electronic domain is the central and main block of the transformation. On the basis of the selected software metrics, the choice of programs for modeling the power conversion system is substantiated, with the possibility of organizing model interfaces to ensure multi-domain modeling and ensuring correct export-import of models when moving between abstraction levels. The sequential use of selected computer-aided engineering (CAE) and ECAD programs is proposed, with the transfer of information about the model and simulation results.This is capable of providing both optimal synthesis of the Automatic Control System based on the Phase Margin criterion with the study of the stability zone according to the Solution map, and in-depth analysis of the energy performance of the power stage of the converters. To test the method, a parallel topology of the power system with a block of supercapacitors, a boost-type converter in voltage control mode and a promising Four-Switch Bidirectional Buck-Boost converter in current control mode were selected. To increase the stability of the system, it is proposed to use a Type3 controller, which combines the capabilities of a compensator and a modulator.*

Originality. *A new approach to modeling the HEV energy subsystem is proposed, which takes into account the multi-domain nature of the system and requires its consideration, first, as an Automatic Control System at the macro level in the CAE program SmartCtrl, with a preliminary expansion of its library by synthesizing Transfer Functions in the ECAD program PSIM, and a subsequent return to the micro level for analyzing energy characteristics and parametric optimization of converters together with control systems at the level of electrical circuits in PSIM. Based on the analysis of the capabilities of the programs for modeling the components of the HEV aggregate system, a variant of the structural diagram of the model of the energy subsystem is proposed, taking into account the possibilities of adequate application of "single-domain" programs and the prospects for their use for multi-domain modeling of HEV are shown. A specific set of program metrics is determined for a reasonable choice of software when studying such systems.*

Practical value. *The presented method of sequential modeling of the energy system in the complex of automated engineering and automated design programs SmartCtrl+PSIM from Altair Group with mutual data exchange provides a comprehensive analysis and optimization of the characteristics of this subsystem of modern vehicles.*

Keywords: hybrid car; energy conversion system; multi-domain systems; CAE and ECAD programs; program metrics; modeling methodology; Solution Map.

REFERENCES

[1] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M.S., (2019). Hydrogen fuel fell technology for the sustainable future of stationary applications, Energies, 12(3):4593. doi 10.3390/en12234593.

[2] Kuru, K., Yetgin, H., (2019). Transformation to advanced mechatronics systems within new industrial revolution: a novel framework in automation of everything (AoE), IEEE Access, 7. 41395–41415. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907809.

[3] Vasylenko, O., (2015). Analysis of programs for mechatronic systems modeling, Radio Electronics, Computer Science, Control, 3. 80–87. doi: 10.15588/1607-3274-2015-3-10.

[4] Minh, V.T., Moezzi, R., Cyrus, J., Hlava, J., (2022). Optimal fuel consumption modelling, simulation,and analysis for hybrid electric vehicles, Appl. Syst. Innov. 5(2), 36. doi: 10.3390/asi5020036.

[5] Tudoroiu, R.E., Zaheeruddin, M., Tudoroiu, N., Radu, S., (2020). SOC estimation of a rechargeable li-ion battery used in fuel-cell hybrid electric vehicles-comparative study of accuracy and robustness performance based on statistical criteria. Part I: Equivalent models, Batteries. 6(42). doi: 10.3390/batteries6030042/

[6] Amal, S., Vishnu, V., Chacko, R. V., Ghugal, S., Mengaji, P., Karle, U., (2017). HiL simulation and controller prototyping of EV/HEV systems using multi-core xEV Real time simulator, IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Pune, India, 1–5, doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8333892/

[7] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M., Trufin, C., Filote, C., (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications, Energies. 12(23):4593. doi: 10.3390/en12234593.

[8] Afshari, E., (2020). Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 139(4). 2423–2434. doi: 10.1007/s10973-019-08354-x.

[9] Castiglia, V., Campagna, N., Spataro, C., Nevoloso, C., Viola, F., Miceli, R., (2020). Modelling, simulation and characterization of a supercapacitor, Conference: IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). 46–51. doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140474.

[10] Majeed, A., (2022). Ansys software for mechanical engineering, Manav Rachna International University. doi: 10.13140/RG.2.2.18076.97927.

[11] [Vasylenko, O.V., Petrenko, Ya.I., (2016). Improving the quality of modeling dynamic systems by choosing optimal simulation algorithms, Radio Electronics, Computer Science, Control, 4. 11–18.

[12] Alonso, A., Marafao, F., Brandao, D., Tedeschi, E., Guerreiro, J., (2017). A guideline for employing PSIM on power converter applications: Prototyping and educational tool, Conference: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). 1–6. doi: 10.1109/COBEP.2017.8257284.

[13] Vasylenko, O.V., Snizhnoi, G.V., Yamnenko, Y.S., (2022). Digital Production Management (monograph), Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 120 p.

[14] Gaoua, Y., Caux, S., Lopez, P., Raga, C., Barrado, A., Lazaro, A., (2014). Hybrid systems energy management using optimization method based on dynamic sources models, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC. 1–10. doi: 10.1109/VPPC.2014.7007079.

[15] Vasylenko, O.V., Snizhnoi, G.V., Ivchenko, S.A., (2023). Concept of modeling electric vehicles for optimizing range in different traffic patterns, Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference on Computer Modeling and Optimization of Complex Systems, Dnipro: UDCTU. 155–156.

[16] Stjepandic, J., Emmer, C., Fröhlich, A., Jäkel, V., (2014). Standardized approach to ECAD/MCAD collaboration, Journal of Aerospace Operations. 3. 587–596. doi: 10.3233/978-1-61499-440-4-587.

[17] Vasylenko, O.V., Petrenko, Ya.I., (2017). Choosing a method for optimizing automatic control systems in automated engineering systems, Power Engineering and Automation. 1. 75–89.

[18] Vasylenko, O., Ivchenko,S., Snizhnoi, H., (2023). Design of information and measurement systems within the Industry 4.0 paradigm, Radioelectronic and Computer Systems. 1. 45–54. doi: 10.32620/reks.2023.1.04.

[19] Fernández, H., (2015). Aplicando el smart controller del PSIM, Commodities. 1–12. doi: 10.13140/RG.2.1.3452.8087

[20] Raga, A., Barrado, I., Quesada, A., Lázaro, C., (2008). Anocíbar, José F. Sierra Analysis and Comparison of Four Regenerative Power Distribution Architectures Based on Fuel Cell, Supercapacitors and Batteries 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics 10-13 November 2008 Orlando, FL, USA. 545–550. doi: 10.1109/IECON.2008.4758012.

[21] Ravi, D., Reddy M, Letha S., Samuel, P., (2018). Bidirectional DC to DC converters: An overview of various topologies, switching schemes and control techniques. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.5). 360-365. doi: 10.14419/ijet.v7i4.5.20107.

[22] Quenzer-Hohmuth, S., Rosahl, T., Ritzmann, S., Wicht, B., (2016). Challenges and implementation aspects of switched-mode power supplies with digital control for automotive applications. Advances in Radio Science. 14. 85-90. doi:10.5194/ars-14-85-2016.