

УДК 681.518.54

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

Ю.М. Бороденко, к. ф-м. н., доцент ХНАДУ

Анотація. Побудовано імітаційну модель енергетичної установки, як об'єкту діагностики, в програмі Matlab/Simulink. Проаналізовано спектральний склад функції струму у колі накопичувача енергії при імітації пошкоджень системи в частині DC/DC перетворювача напруги.

Ключові слова: гібридний автомобіль, електропривод, синхронний генератор, високовольтна акумуляторна батарея, енергетична установка, діагностичний параметр, імітаційна модель, спектрограма.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Ю.Н. Бороденко, к. ф-м. н., доцент ХНАДУ

Аннотация. Построена имитационная модель энергетической установки, как объекта диагностики, в программе Matlab/Simulink. Проанализирован спектральный состав функции тока в цепи накопителя энергии при имитации поврежденной системы в части DC/DC преобразователя напряжения.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, электропривод, синхронный генератор, высоковольтная аккумуляторная батарея, энергетическая установка, диагностический параметр, имитационная модель, спектрограмма.

IDENTIFICATION OF FAULTS POWER PLANTS HYBRID VEHICLE

Y. Borodenko, associate professor, cand. phy.-mat. sc., KhNAHU

Abstract. Built simulation model of power plants, as diagnosis object, the program Matlab/Simulink. Analyzed the spectral content of the current function in the circuit of the energy storage device when simulating damages of the system by the DC/DC voltage converter.

Keywords: hybrid vehicle, electrical drive, synchronic generator, power plants, high-voltage accumulation battery, diagnostic parameter, virtual model, spectrogram.

Вступ

Невід'ємною частиною електроприводу (ЕП) гібридного автомобіля є енергетична установка (ЕНУ), яка забезпечує потужністю тяговий електродвигун за рахунок енергії ДВЗ або рекуперативного процесу під час гальмування [1]. Зниження експлуатаційних витрат на технічне обслуговування електричних

концептів можливо за рахунок удосконалення засобів та методів діагностики. Такі задачі вирішуються на етапах розробки силової частини (адаптація конструкції приводу) та під час транспортного процесу автомобіля (моніторинг технічного стану вузлів та агрегатів). При цьому, виникає необхідність у створенні експертних систем, які оперують інформаційними базами знань і даних.

Аналіз публікацій

В загальному випадку система ЕП функціонує в двох основних режимах – мотору і генератору. Результати досліджень електричних процесів в колах живлення електроприводу, як діагностичної інформації, поетапно приведені автором статті в попередніх публікаціях [2...4].

В [2] представлені результати моделювання системи ЕП в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink та визначені передумови для гармонічного аналізу електричних процесів. Результати в [3, 4] показують, що вимогам, які висувуються до діагностичного параметру найбільш задовольняє характер зміни струму у колі первинного джерела живлення. На першому кроці в [3], проведено якісний аналіз процесів в системі вентильного двигуна на стаціонарних режимах без перетворювача підвищеної напруги. В моделі системи використовувалася спрощена модель високвольтової акумуляторної батареї (ВАБ) з визначеним внутрішнім опором. Кількісна оцінка функції струму ВАБ в [4] проведена на підставі спектрального аналізу для моделі системи ЕП з перетворювачем підвищеної напруги та Simulink-моделлю нікель-метал-гібридної ВАБ.

Оскільки ЕП в режимі генератора має аналогічну структуру та режими функціонування, а ВАБ, як джерело енергії ЕП, є спільною ланкою між електродвигуном та електрогенератором, аналіз процесів в ЕНУ є логічним продовженням досліджень ЕП, як об'єкту діагностики.

Мета досліджень та постановка задачі

Метою досліджень на даному етапі є формування бази даних експертної системи для ідентифікації технічного стану ЕНУ автомобіля на віртуальному рівні. Для цього треба побудувати програмну модель системи та імітувати пошкодження її елементів в експлуатаційних режимах, спостерігаючи за спектральним складом функції струму у колі ВАБ. Вирішення цих задач передбачає реалізацію декількох функцій самодіагностики, залежно від режиму функціонування ЕП.

Об'єкт діагностики та метод дослідження

Як об'єкт діагностики, розглядається силова частина ЕНУ автомобіля, яка складається з ВАБ, синхронного генератора *GM* з трьохфазним випрямлячем *VD1...VD6* та DC/DC перетворювача пониженої напруги, реалізованого на елементах *VT, L, C1, C2, VD* (рис. 1).

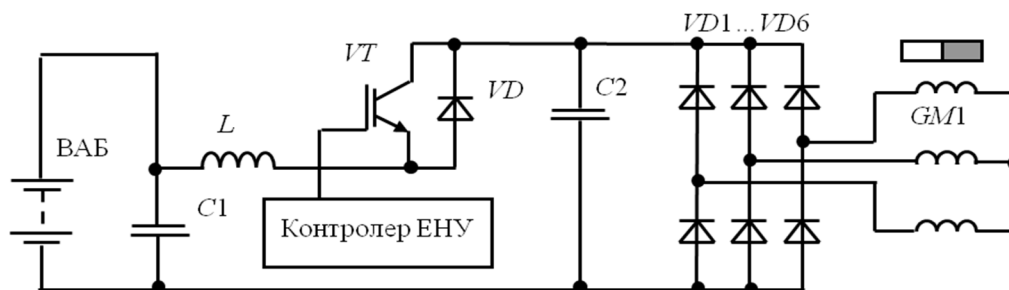


Рис. 1. Схема електрична принципова енергетичної установки

Генератор приводиться в дію обертовим моментом від валу ДВЗ в режимі підзарядки або від коліс автомобіля в режимі рекуперації. Оптимальний режим зарядки ВАБ підтримується ключем *VT*. Ключ керується сигналом з контролеру ЕНУ на який надходить інформація про швидкісний режим генератора, рівень зарядки ВАБ, положення педалі гальм та інтенсивності її натиснення [1].

Імітаційна модель системи ЕНУ побудована в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink (рис. 2). В схемі системи використовується Simulink-модель синхронної машини №12

(Generator) з випрямлячем (Diode bridge), який обертається зі швидкістю $n_G=850$ хв.⁻¹ (Speed Ref). У якості ВАБ обрано модель NiMH-типу (Battery) з номінальною напругою $U_H=220$ В і номінальною ємністю $C_H=5$ А/год. Заряд ВАБ здійснюється через перетворювач постійної напруги 500/250 В. Транзисторний ключ перетворювача (IGBT) керується генератором прямокутних імпульсів (Pulse Generator) на стаціонарному режимі (частота 20 кГц). Значення параметрів пасивних елементів моделі відповідають номіналам елементів блоку перетворювачів напруги автомобіля Lexus RX400h.

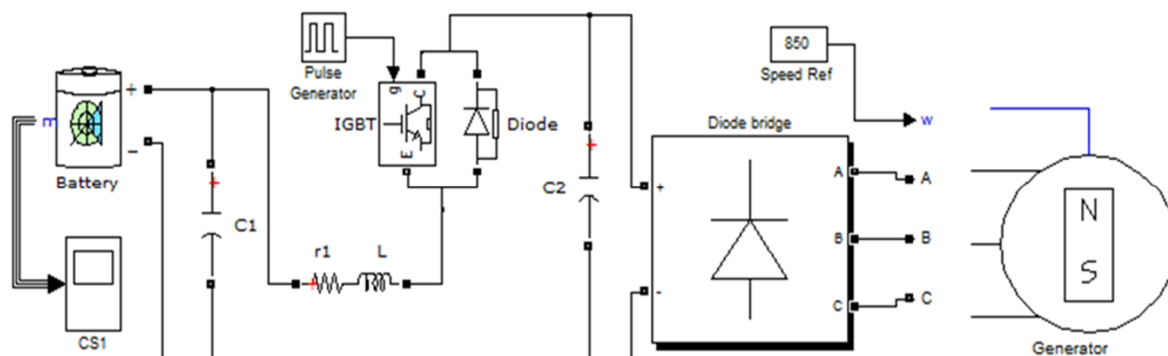


Рис. 2. Matlab-модель енергетичної установки

Для спостереження миттєвих значень струму в колі ВАБ використовується осцилограф SC1 з функцією аналізатора спектру.

Імітацію структурних пошкоджень силової частини системи ЕНУ виконуємо шляхом перемикачів та обривів її елементів. В межах статті, для прикладу, проаналізовано декілька несправних станів DC/DC перетворювача напруги згідно наведеної схеми. Ідентифікацію структурних пошкоджень системи про-

водимо на підставі аналізу характеру періодичних процесів, шляхом кількісної оцінки діагностичного параметру, за результатами спектрального аналізу часових функцій струму ВАБ.

Результати досліджень

На часовій діаграмі, яка відтворює функцію струму через ВАБ, аналізуються дві характерні ділянки (рис. 3).

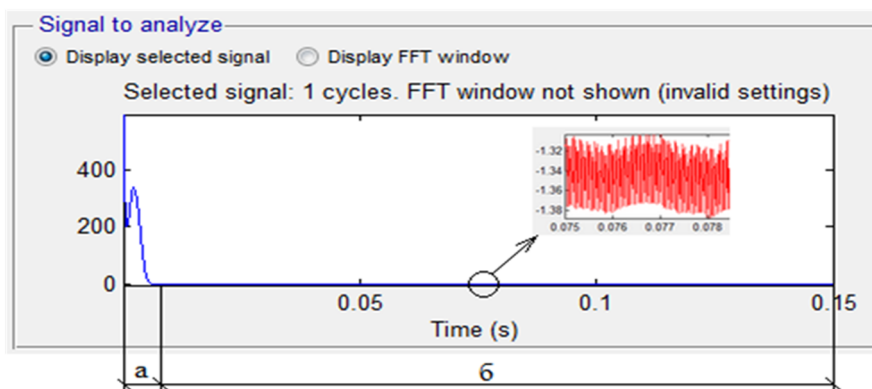


Рис. 3 Часова функція струму заряду ВАБ справної системи: а – в період підключення кола навантаження генератора; б – під час стаціонарного навантаження

Під час запуску моделі (в період часу $t < 0,0075$ с) спостерігається кидок струму (рис. 3, ділянка а), викликаний зарядом ємностей конденсаторів $C1, C2$ (процес розряду ВАБ). Максимальні значення цього струму обмежуються внутрішнім опором ВАБ і активним опором реактору $r1$ та становлять сотні ампер. Тривалість кидка струму розряду визначається значенням ємностей конденсаторів. При цьому, напруга джерела підсаджується на величину падіння напруги на внутрішньому опорі батареї і складає близько $U_{ВАБ} = 160$ В. Далі, протягом часу $t > 0,0075$ с підтримується сталий режим навантаження (рис. 3, ділянка б) та відбувається заряд ВАБ струмом, що складає одиниці ам-

пер. В сталому режимі відбувається періодичний процес обумовлений перемиканням транзисторного ключа перетворювача напруги з частотою 20 кГц.

Для проведення спектрального аналізу методом «Швидкого перетворення Фур'є» (FFT-аналізу) обрані певні опції налаштування FFT аналізатора (t_0 – момент початку відліку; Δt – період відліку; F – фундаментальна частота, що визначає ступінь дискретизації спектральної характеристики; F_{\max} – частота верхньої гармоніки спектральної характеристики), які забезпечують задовільну інформативність для обох ділянок функції, що розглядаються.

На рис. 4 і 5 показані результати досліджень у вигляді фрагментів осцилограм струму живлення та спектральних характеристик його часових функцій за відповідні періоди відліку для обраних режимів спостереження. В полі рисунків позначено амплітуди базових гармонік $I_A(FF)$ і коефіцієнти гармонік THD функцій струму на відповідних режимах. На осях ординат спектральних характеристик відкладено відсоток від амплітуди базової гармоніки %FF. Отже, абсолютні дискретні значення амплітуди кожної j -тої гармоніки функції струму, пропорційні їх ординатам

$I_A(f_j) = \%FF(f_j) \cdot FF / 100$ А. Як параметри, що дозволяють розрізнити стани системи за результатами спектрального аналізу, розглядаються: спектральний склад $I_A(f_j)$, коефіцієнт гармонік THD та фазовий зсув гармонік.

За виглядом осцилограм функцій пускового кидка спостерігається струм заряду тільки конденсатора $C2$ (рис. 4, б), тільки конденсатора $C1$ (рис. 4, г), обох конденсаторів разом (рис. 4, а, в). При цьому, останні два стани не розрізняються між собою ні за характером зміни функцій ні за спектральним складом.

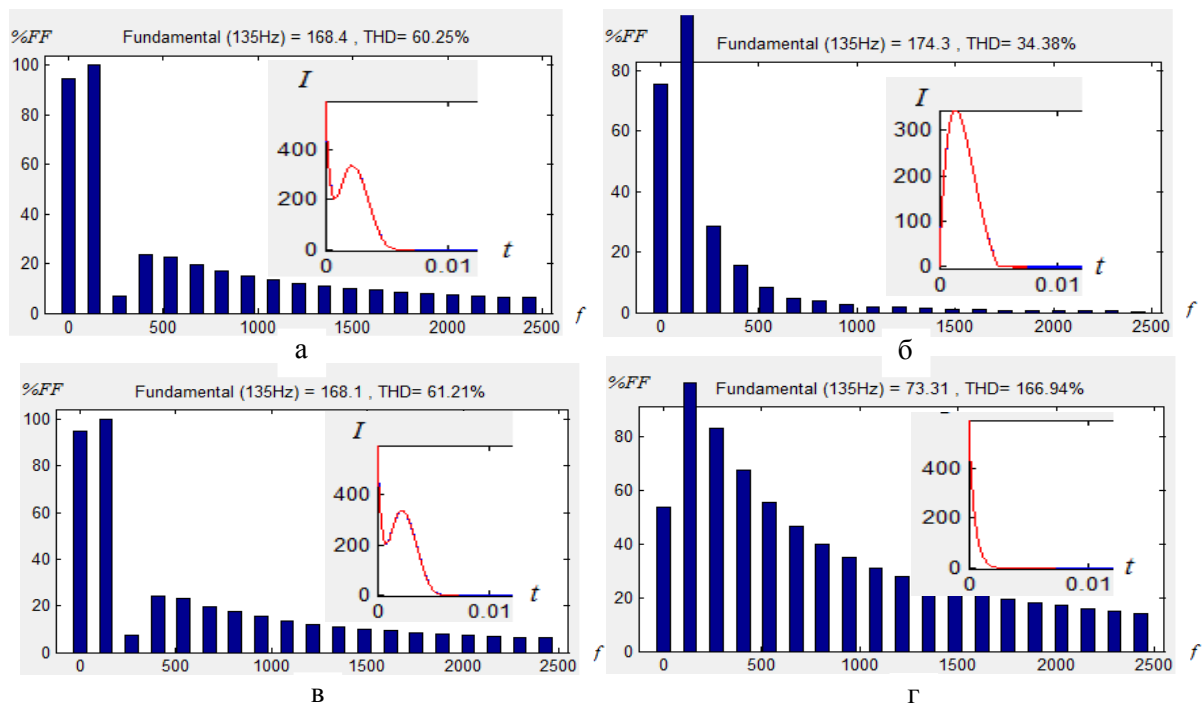


Рис. 4 Спектральний склад функцій струму в період підключення навантаження: а – справної системи; б – з обірваним конденсатором $C1$; в – при непрацюючому перетворювачі напруги; г – з обірваним конденсатором $C2$

На сталому режимі навантаження системи усі стани, що розглядаються, різняться за характером зміни функцій та відповідно і за спектральним складом (рис. 5). При цьому, періодична функція струму заряду має спектральні складові обумовлені частотою перемикання транзисторного ключа перетворювача напруги та швидкістю обертання генератора.

На спектрограмах можна виділити характерні (з домінуючою амплітудою) складові (комбінації складових) за якими ідентифікується кожний з розглянутих станів системи. Так, наприклад, на частоті 500 Гц, згідно фо-

рмулі наведеній вище, амплітудні значення гармоніки становлять: 4,5 мА – для справного стану; 2,0 мА – при обірваному конденсаторі $C1$; 3,0 мкА – при непрацюючому перетворювачі напруги; 570 мкА – при обірваному конденсаторі $C2$. До того ж, для стану з обірваним $C1$ виникає характерна гармоніка з частотою 2125 Гц.

Слід додати, що наведені результати віртуальних досліджень носять більш демонстраційний характер ніж дослідний, оскільки в моделі системи не враховуються деякі особливості реальних пристроїв.

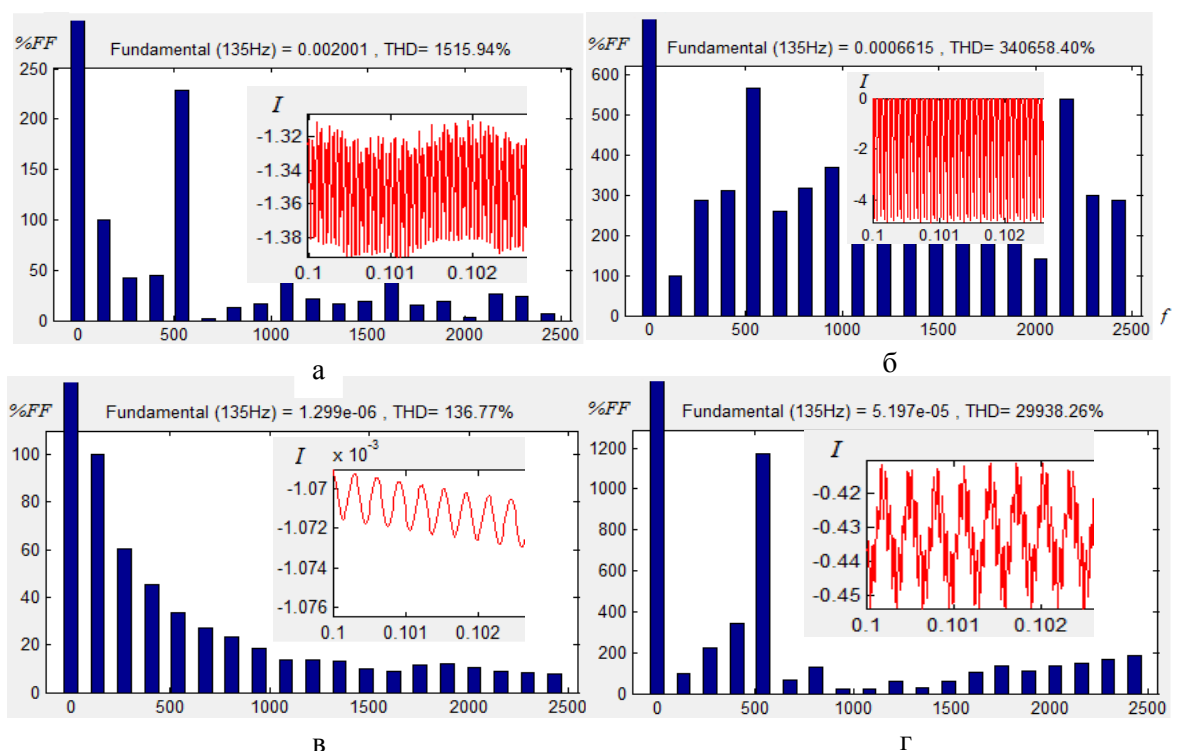


Рис. 5 Спектральний склад функцій струму під стаціонарним навантаженням:
 а – справної системи; б – з обірваним $C1$; в – при непрацюючому перетворювачі напруги;
 г – з обірваним конденсатором $C2$

Висновки

Для локалізації несправності у силових колах ЕНУ доцільно проводити спектральний аналіз часових функцій струму у колі ВАБ на різних режимах функціонування системи.

Інформативність спектрограм, як характеристики діагностичного параметра, визначається опціями настроювання FFT аналізатора. Переважними, збоку інформативності є спектрограми, що характеризують сталий режим зарядження ВАБ.

При аналізі спектрограм доречно визначитись з границями достовірності результатів вимірювання діагностичного параметра, оскільки кінцеві значення струму у колі живлення можуть свідчити про не ідеальність напівпровідникових ключів, а не про їх пошкодження.

Література

1. Гібридні автомобілі / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В. та ін. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Бороденко Ю.М. Концепція діагностики електроприводу гібридного автомобіля /

Ю.М. Бороденко, А.В. Черевач. // Автомобильный транспорт. Сб. Научных трудов. Харьков: ХНАДУ, 2012. – вып. № 30. – С. 59 – 64.

3. Бороденко Ю.М. Якісний аналіз гармонійних процесів по колах живлення електроприводу автомобіля / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.Д. Приходько // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2015. – №.7 – С. 158 – 163.
4. Бороденко Ю.М. Спектральний аналіз електричних процесів по колах живлення електроприводу автомобіля / Ю.М. Бороденко, Є.В. Трішкин // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2015. – №8. – С. 6 – 11.

Рецензент: Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла в редакцію 01 червня 2016 р.