

УДК 681.518.54

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБІЛЯ З ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ

Ю.М. Бороденко, доц., к. ф-м. н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто імітаційну модель системи електропривода з вентилювальним двигуном як об'єкта діагностики у програмі Matlab/Simulink. Проаналізовано спектральний склад функції струму споживання на різних режимах електродвигуна при імітації пошкоджень системи в частині перетворювача підвищеної напруги.

Ключові слова: автомобіль, електропривід, вентилювальний електродвигун, високовольтна акумуляторна батарея, діагностичний параметр, імітаційна модель, спектрограма.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Ю.Н. Бороденко, доц., к. ф-м. н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Рассмотрена имитационная модель системы электропривода с вентилювальным двигателем как объекта диагностики в программе Matlab/Simulink. Проанализирован спектральный состав функции тока потребления на различных режимах электродвигателя при имитации поврежденной системы в части преобразователя повышенного напряжения.

Ключевые слова: автомобиль, электропривод, вентилювальний електродвигатель, високовольтная аккумуляторная батарея, диагностический параметр, имитационная модель, спектрограмма.

IDENTIFICATION OF BRUSHLESS MOTOR VEHICLE ELECTRIC DRIVE FAULTS

Y. Borodenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Phys.-Math.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. A simulation model of the system of the electric drive with a brushless motor, as a diagnostic object in the program Matlab/Simulink is reviewed. The spectral content of the function of current consumption in motor operation when simulating damages of the system in the high voltage inverter is analyzed.

Key words: vehicle, electrical drive, brushless electrical motor, high-voltage accumulation battery, diagnostic parameter, virtual model, spectrogram.

Вступ

Актуальність проблеми, що пов'язана з дослідженням електричних процесів по колах живлення електропривода (ЕП) автомобіля, як діагностичної інформації визначена в [1]. Зниження експлуатаційних витрат на технічне обслуговування автомобілів з ЕП можливе за рахунок удосконалення засобів та методів діагностики. Такі задачі вирішуються на ета-

пах розробки систем ЕП (адаптація конструкції) та під час транспортного процесу автомобіля (моніторинг технічного стану). При цьому виникає необхідність створення експертних систем, які оперують інформаційними базами знань і даних. У статті розглядаються результати апробації методу спектрального аналізу електричних процесів у колі живлення імітаційної моделі ЕП на предмет використання отриманої інформації

для формування діагностичної бази знань за параметрами спектрограм.

Аналіз публікацій

Електричні кола системи ЕП умовно поділяють на сигнальні (датчиків і виконавчих пристроїв) та силові (джерел живлення й електричних машин). Стосовно перших, для контролю технічного стану елементів системи керування застосовують засоби інтегрованої самодіагностики. При цьому здійснювати контроль за технічним станом силових елементів, які не мають гальванічних зв'язків з електронним блоком керування, неможливо без застосування додаткових вимірювальних каналів.

У [1] подані результати моделювання системи ЕП в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink, на підставі яких визначені передумови для гармонійного аналізу електричних процесів по колах системи ЕП.

Результати попередніх досліджень [2, 3] показують, що вимогам, які висуваються до діагностичного параметра з боку інформативності, чутливості й технологічності вимірювання, найбільш задовольняє характер зміни струму розряду первинного джерела живлення.

На першому кроці в [2] проведено якісний аналіз процесів у системі вентильного двигуна на стаціонарних режимах без вторинного джерела живлення (перетворювача підвищеної напруги). У моделі системи використовувалася спрощена модель високовольтної акумуляторної батареї (ВАБ) у вигляді ідеалізованого джерела електрорушійної сили з визначеним внутрішнім опором.

Кількісна оцінка часової функції струму ВАБ в [3] проведена на підставі спектрального аналізу для моделі системи ЕП з перетворювачем підвищеної напруги. При цьому як первинне джерело постійного струму було обрано Simulink-модель нікель-метал-гібридної ВАБ. Вигляд спектрограм, отриманих за результатами моделювання, підтверджує напрямок досліджень.

Мета і постановка завдання

Метою досліджень на даному етапі є формування бази даних експертної системи для ідентифікації технічного стану ЕП автомобі-

ля. Для цього в отриманій моделі системи [3] потрібно імітувати пошкодження її елементів в експлуатаційних режимах та спостерігати за спектральним складом функції струму в колі живлення. Вирішення цих задач передбачає реалізацію декількох функцій самодіагностики залежно від режиму функціонування ЕП.

Реєстрація несправності під час пуску дозволяє уникнути важких наслідків шляхом аварійного відключення живлення системи. Тестування на режимі холостого ходу запобігає аварійній ситуації, що може виникнути під час руху автомобіля. Моніторинг технічного стану гібридної установки під час транспортного процесу забезпечує аварійний режим функціонування шляхом перерозподілу потужності між її силовими елементами.

Об'єкт діагностики та метод дослідження

Як об'єкт діагностики розглядається силова частина ЕП автомобіля, яка складається з трифазного синхронного електродвигуна, інвертора та схеми керування, регулятора швидкості обертання, перетворювача підвищеної напруги. Імітаційна модель системи ЕП побудована в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink [3]. Живлення системи вентильного електродвигуна забезпечується від первинного джерела напруги ВАБ з номінальною напругою 250 В. У межах статті увагу зосереджено на схемі перетворювача постійної підвищеної напруги 250/500 В (рис. 1).

У схемі системи використовується Simulink-модель синхронної машини з номінальним обертовим моментом $M_H = 35$ Нм та номінальною швидкістю обертання $n_H = 3000$ хв⁻¹. Транзисторний ключ перетворювача VT керується генератором прямокутних імпульсів (Generator) на стаціонарному режимі (частота 20 кГц).

Значення параметрів пасивних елементів моделі відповідають номіналам елементів схеми блока перетворювачів напруги автомобіля Lexus RX400h. Для спостереження миттєвих значень струму розряду ВАБ і швидкості обертання вала електродвигуна використовується осцилограф Scope з функцією аналізатора спектра (FFT-Analysis).

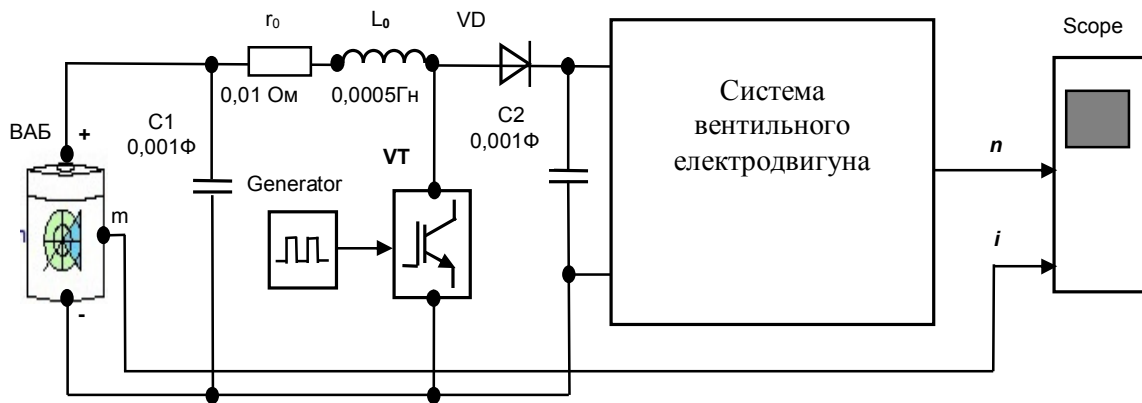


Рис. 1. Схема імітаційної моделі перетворювача напруги у складі електропривода з вентильним двигуном

Моделювання системи виконується на режимах пуску без навантаження, холостого ходу та під заданим навантаженням двигуна $M=37$ Нм, за якого підтримується швидкість обертання вала $n=850$ хв⁻¹. Подача навантаження на електродвигун відбувається через 0,3 с після його вмикання.

Імітацію структурних пошкоджень силової частини системи ЕП виконуємо шляхом перемикання та обривів її елементів. У межах статті, для прикладу, проаналізуємо декілька несправних станів перетворювача підвищальної напруги згідно з наведеною схемою.

Ідентифікацію структурних пошкоджень системи проводимо на підставі аналізу характеру періодичних процесів. При цьому спочатку проводимо суб'єктивну оцінку незадовільної роботи системи, ставимо діагноз на підставі симптому (зміна швидкості обертання вала електродвигуна), а потім – апаратну діагностику шляхом кількісної оцінки діагностичного параметра за результатами спектрального аналізу часових функцій струму ВАБ.

Результати досліджень

Після активізації моделі отримано осцилограми означених функцій для справного та несправних станів системи (рис. 2). При аналізі механічних процесів розглядаються окремі режими (ділянки діаграм). Результати аналізу показують таке.

Для справної системи (рис. 2, а) на період пуску двигуна $t<0,05$ с після вмикання живлення відбувається кидок струму, спричинений пусковим моментом та зарядом ємності С1. Амплітудні значення струму обмежують-

ся, в основному, внутрішнім опором ВАБ. При цьому швидкість обертання ротора зростає до постійних обертів холостого ходу. Далі, в період холостого ходу ($0,05<t<0,3$ с), середні значення струму споживання становлять одиниці ампер, а оберти ротора електродвигуна підтримуються на заданому рівні ($n=850$ хв⁻¹).

Після подачі навантаження на вал двигуна ($t>0,3$ с) струм споживання (розряду ВАБ) підвищується та періодично змінюється відповідно до значень обертового моменту. Кутова швидкість вала ротора також має незначні коливання з частотою зміни миттєвих значень обертового моменту, діючі значення якого визначаються моментом опору (заданим навантаженням).

Обрив кола конденсатора (рис. 2, б) практично не призводить до зміни обертів n , і тому симптом несправності не реєструється.

У разі порушення кола транзисторного ключа (рис. 2, в) напруга живлення інвертора дорівнює напрузі ВАБ. При цьому пуск і холостий хід електродвигуна відбуваються без симптомів, а під навантаженням оберти вала n спадають до 610 хв⁻¹ на холостому ходу та виникає деяка нерівномірність обертання.

Пробій діода (рис. 2, г) викликає шунтування перетворювача напруги, струм ВАБ обмежується тільки резистивним опором кола живлення. Недостатній момент на холостому ходу повільно і нерівномірно обертає ротор двигуна із середньою швидкістю $n=30$ хв⁻¹. Під навантаженням (у цьому випадку) електродвигун зупиняється. Таким чином, на підставі симптомів ідентифікуються несправності, що призводять до статичного стану перетворювача напруги.

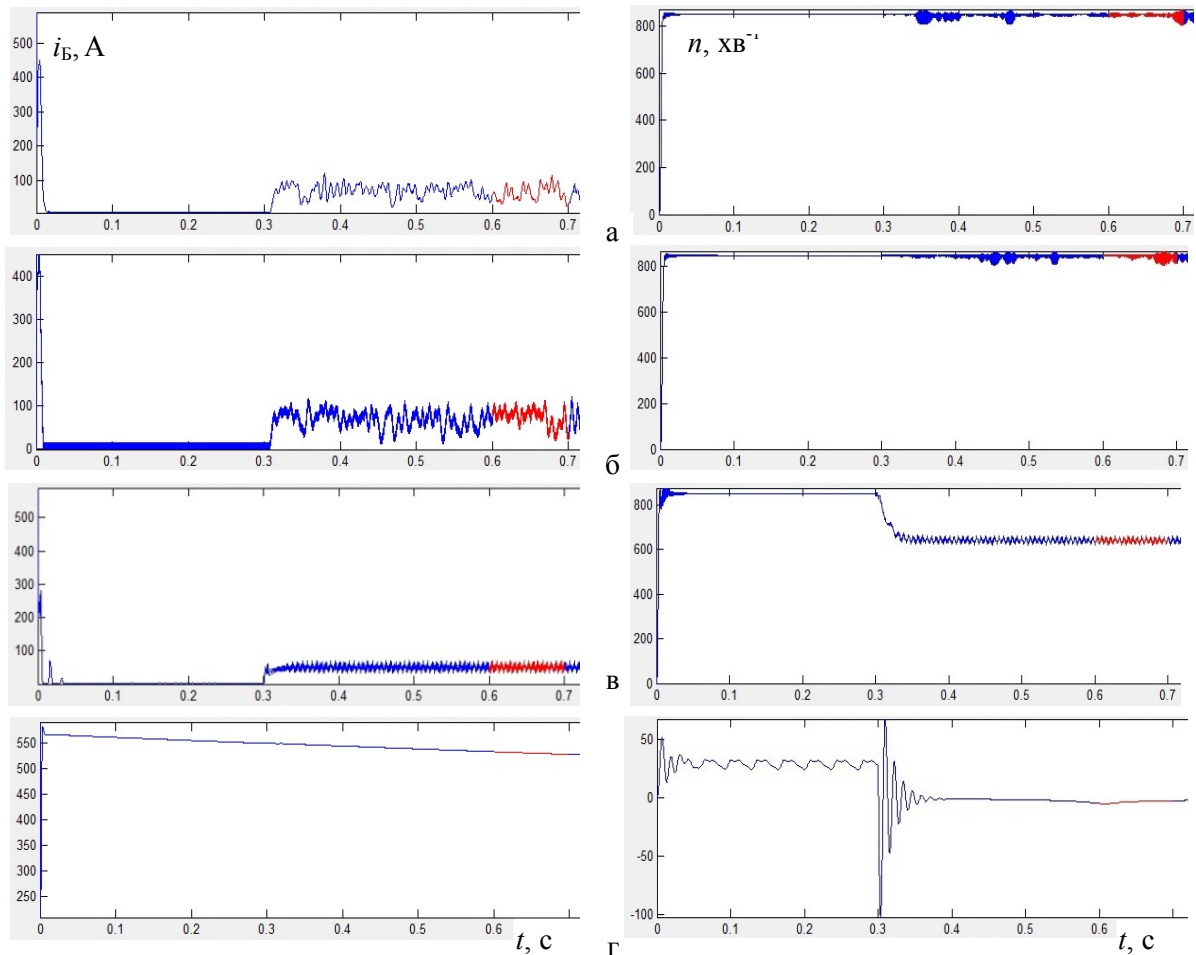


Рис. 2. Часові функції швидкості обертання вала електродвигуна та струму розряду ВАБ в технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором С1; в – при перетворювачі напруги, що не працює; г – з пробитим діодом

Варто розуміти, що несправності, які не ідентифікуються за симптомами незадовільної роботи ЕП, призводять до зниження енергетичних якостей силової установки (підвищення витрати палива в гібридах, скорочення автономного пробігу в електромобілях). Тому, щоб відокремити несправний стан системи з обірваним конденсатором (рис. 2, б) від справного, треба провести спектральний аналіз функції струму ВАБ, характер зміни якої має навіть якісні відмінності.

Для проведення спектрального аналізу методом «Швидке перетворення Фур'є» (FFT-аналізу) обрані певні опції настроювання 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 кожного з трьох режимів.

На рис. 3 показано спектрограми, отримані під час пуску електродвигуна. У полі рисунків позначено амплітуди базових гармонік $I_A(\text{FF})$ і коефіцієнти гармонік ТНД функцій струму на відповідних режимах.

На осях ординат спектральних характеристик відкладено відсоток від амплітуди базової гармоніки %FF. Отже, абсолютні дискретні значення амплітуди кожної j -ї гармоніки функції струму пропорційні їх ординатам $I_A(f_j) = \%FF(f_j) \cdot \text{FF} / 100$ А. Як параметри, що дозволяють розрізнити стани системи за результатами спектрального аналізу, розглядаються: спектральний склад $I_A(f_j)$, коефіцієнт гармонік ТНД та фазовий зсув гармонік. Аналіз отриманих спектрограм дозволяє сказати наведене нижче.

Спектрограми функцій пускового кидка струму для всіх технічних станів, що розглядаються, різняться за амплітудними показниками та дозволяють розрізнити всі технічні стани системи, що розглядаються.

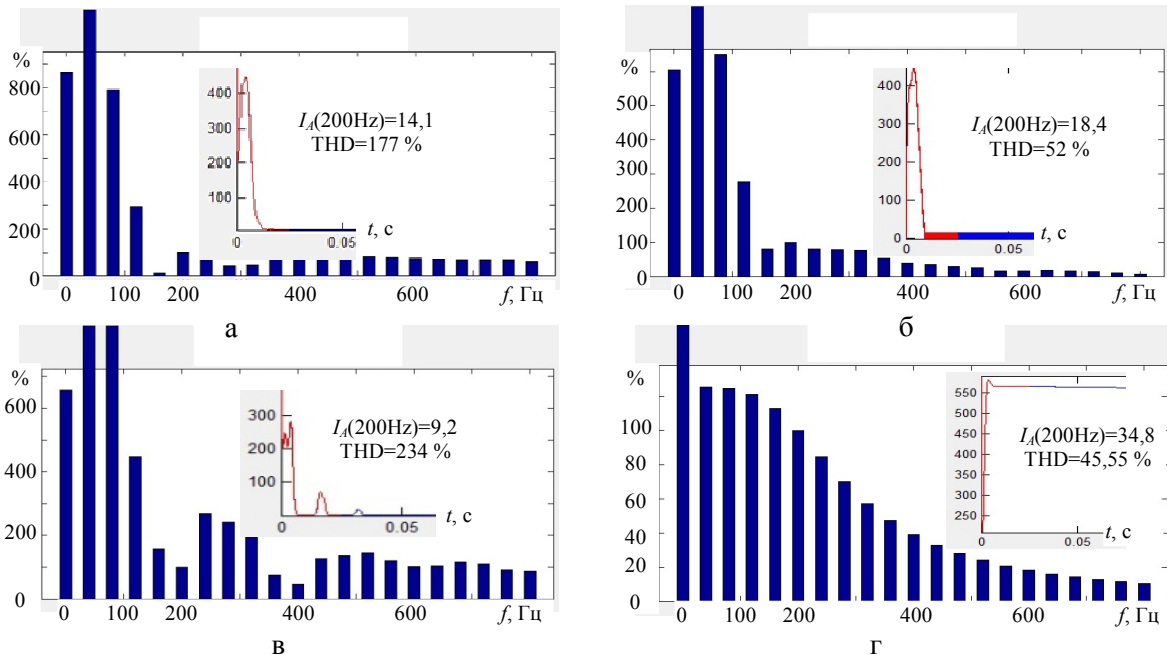


Рис. 3. Спектральний склад часових функцій струму в колі живлення під час пуску електродвигуна у технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором С1; в – при перетворювачі напруги, що не працює; г – з пробитим діодом

На режимі холостого ходу стан з обірваним конденсатором відокремлюється від справного стану за рівнями постійної складової та гармоніки $f=20$ кГц (рис. 4, а і б).

амплітудними значеннями складових і коефіцієнтом гармонік (рис. 4, в і г). Під час функціонування ЕП під навантаженням спектрограми технічних станів, що розглядаються, різняться між собою і за якісними, і за кількісними показниками (рис. 5).

Останні два стани, на перший погляд, якісно не розрізняються, але кількісно різняться за

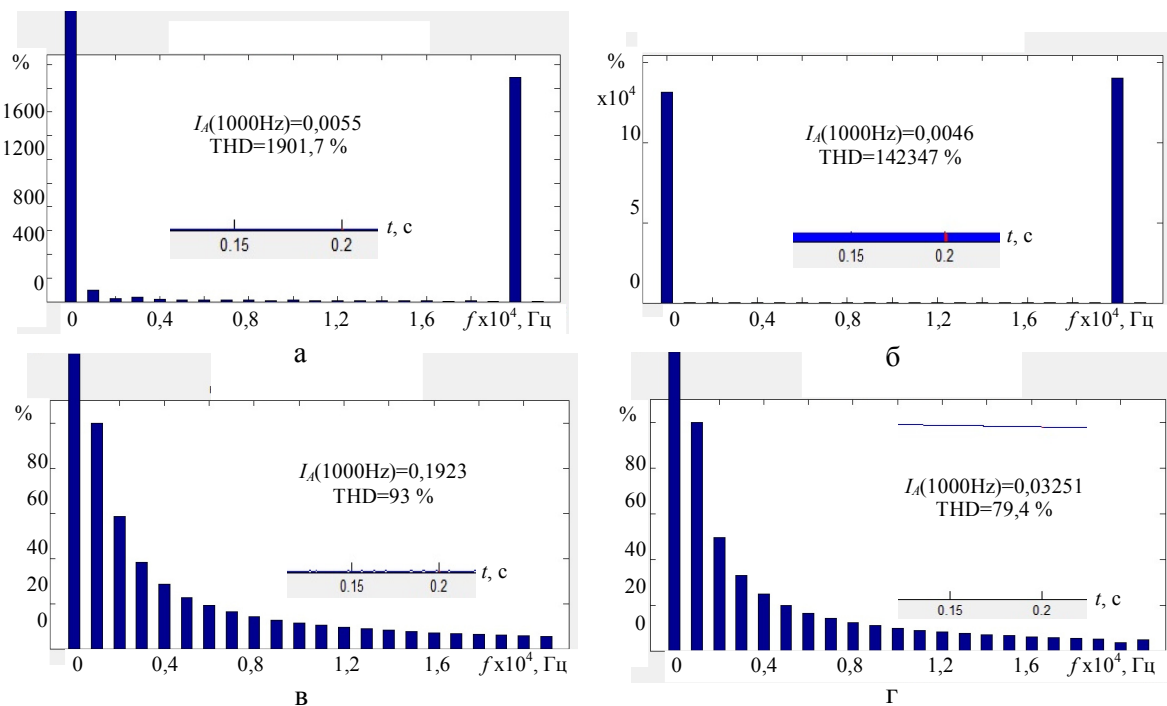


Рис. 4. Спектральний склад часових функцій струму в колі живлення в період холостого ходу електродвигуна в технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором С1; в – при перетворювачі напруги, що не працює; г – з пробитим діодом

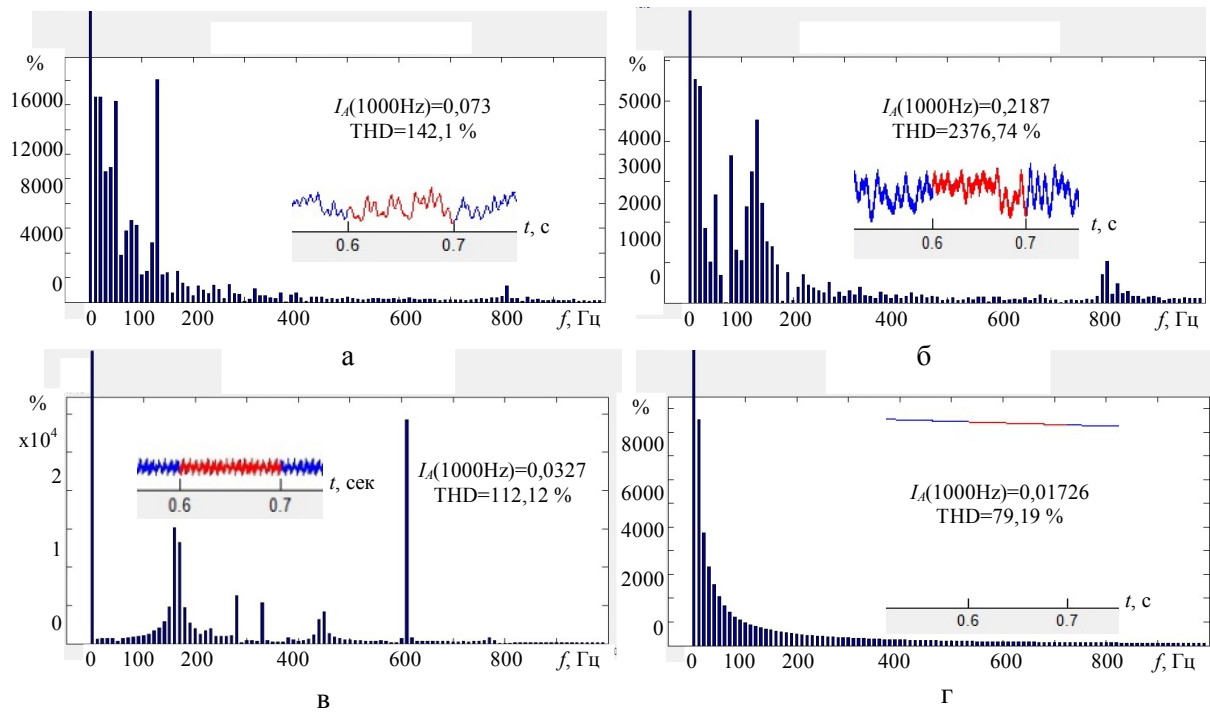


Рис. 5. Спектральний склад часових функцій струму в колі живлення при функціонуванні електродвигуна під навантаженням у технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором С1; в – при перетворювачі напруги, що не працює; г – з пробитим діодом

Зрозуміло, що ідентифікація станів за спектральним складом, яка підтверджує реєстрацію несправностей за симптомами, не є надлишковою, тому що в наведених прикладах розглядаються не всі можливі технічні стани системи, де ця інформація буде в нагоді.

Висновки

Для локалізації несправності у силових колах електропривода поряд з аналізом симптомів їх прояву доцільно проводити спектральний аналіз часових функцій струму живлення на різних режимах функціонування системи.

Інформативність спектрограм як характеристика діагностичного параметра визначається опціями настроювання FFT аналізатора. Ці опції призначаються спираючись на такі рекомендації. Верхню границю частоти спектра F_{\max} варто обирати відповідно до максимальної частоти комутації струму перетворювача (на даній моделі Generator – 20 кГц), а період дискретизації спектральної характеристики та, відповідно, фундаментальну частоту F – кратними до швидкості обертання електродвигуна та, відповідно, і частоти перемикавання ключів інвертора з урахуванням числа фаз машини.

Література

1. Бороденко Ю.М. Концепція діагностики електропривода гібридного автомобіля / Ю.М. Бороденко, А.В. Червач // Автомобільний транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 30. – С. 59–64.
2. Бороденко Ю.М. Якісний аналіз гармонійних процесів по колах живлення електропривода автомобіля / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.Д. Приходько // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – 2015. – №.7 – С. 158–163.
3. Бороденко Ю.М. Спектральний аналіз електричних процесів по колах живлення електропривода автомобіля / Ю.М. Бороденко, Є.В. Трішкин // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – 2015. – №8. – С. 6–11.

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

Стаття надійшла до редакції 01 квітня 2016 р.