

УДК 681.518.54

## КОНЦЕПЦІЯ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

Ю.М. Бороденко, к. ф.-м. н., доцент, А.В. Черевач, магістрант, ХНАДУ

*Анотація.* Розглянуто концептуальний підхід до створення системи діагностики силових елементів електропривода гібридного автомобіля. Проведено апробацію імітаційної моделі електропривода з вентильним двигуном як об'єкта діагностики.

*Ключові слова:* гібридний автомобіль, електропривід, діагностичний параметр, імітаційна модель, структурна й параметрична ідентифікація несправності.

## КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Ю.Н. Бороденко, к. ф.-м. н., доцент, А.В. Черевач, магистрант, ХНАДУ

*Аннотация.* Рассмотрен концептуальный подход к созданию системы диагностики силовых элементов электропривода гибридного автомобиля. Проведена апробация имитационной модели электропривода с вентильным двигателем как объекта диагностики.

*Ключевые слова:* гибридный автомобиль, электропривод, диагностический параметр, имитационная модель, структурная и параметрическая идентификация неисправности.

## DIAGNOSTICS CONCEPTION OF ELECTRICAL DRIVE OF A HYBRID VEHICLE

Y. Borodenko, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Science, A. Cherevach, postgraduate, KhNAHU

*Abstract.* Conceptual approach to create the diagnostic system of the power elements of the electric drive of the hybrid vehicle has been considered. Approbation of the imitation model of electric drive with brushless DC electric motor as a diagnostic object has been carried out.

*Key words:* hybrid vehicle, electrical drive, diagnostic parameter, virtual model, structural and parametric trouble identification.

### Вступ

Створення гібридних енергоустановок (ГСУ) є однією з актуальних проблем сучасного автомобілебудування [1]. Розробкою ГСУ займаються провідні автомобілебудівні компанії світу. Застосування ГСУ дозволяє кардинально знизити витрати палива і кількість шкідливих викидів автомобілями. Техніко-економічні характеристики автотранспортних засобів із ГСУ щорічно поліпшуються, технологія їх виробництва удосконалюється й дешевшає. Попит на автомобілі з ГСУ зростає, актуальність проблем, що пов'язані з

обслуговуванням гібридних концептів, підвищується.

При створенні ГСУ надзвичайно важливого значення набувають питання вибору силових та енергетичних елементів, принципу накопичення енергії, принципової схеми, типу теплового двигуна, його потужності і режимів роботи. Другий аспект удосконалення гібридів полягає у зниженні експлуатаційних витрат у частині їх технічного обслуговування та ремонту, де діагностика технічного стану ГСУ відіграє домінуючу роль.

### Аналіз публікацій

Сьогодні серійно випускаються легкові і вантажні автомобілі й автобуси з ГСУ багатьма великими автомобілебудівними фірмами світу (Honda, General Motors, Toyota, Lexus, Ford, Volkswagen), крупними енергетичними компаніями і національними лабораторіями (EPRI, General Electric, NREL, INEEL, ISE Research).

В легкових автомобілях Тойота (Camry Hybrid, Highlander Hybrid, Prius, Lexus RX-400h, Lexus GS-450h) та Форд (Escape Hybrid, Mercury Mariner Hybrid) використовують змішану схему компоновки ГСУ, в якій використовуються дві електричні машини, що функціонують у режимах двигуна і генератора [2, 3].

Електропривід (ЕП) транспортного засобу складається з електронної (керуючої та силової), електричної (кола обмоток машин та апаратів) та механічної (трансмісії) частин і розглядається як складна діагностична модель. Несправності такої системи можуть бути викликані і виходом з ладу електронних компонентів, і руйнуванням елементів електричних кіл, і зносом механічних частин. Між тим наявність електричної частини значно спрощує процес контролю та отримання інформації про стан системи.

При діагностуванні ЕП загальної структури застосовують відомі методи і підходи: послідовної перевірки «від кінця до початку»; імітації проміжних сигналів; розмикання кола зворотного зв'язку; заміни та виключення окремих елементів. Під час перевірки керуючої частини ЕП доцільно використовувати метод сигнатурного аналізу [4, 5].

Методика (технологія) діагностування, в більшості випадків, визначається метою перевірки (регламентна, екстрена) та глибиною локалізації несправності (за вихідними або структурними параметрами), рівнем кваліфікації оператора та засобів діагностики, фактичним станом системи ЕП на час діагностування (наявність ознак несправності) [6].

В загальному випадку перевірку електричної частини ЕП починають з контролю рівнів напруги всіх джерел живлення на неробочому ході та під номінальним навантаженням у статичних режимах (без подачі вхідних сигналів). Обладнання керуючої частини приво-

ду перевіряють на адекватність вихідних сигналів за початкових умов без зміни станів на її входах. Подальша локалізація несправностей полягає в перевірці напруг і сигналів у контрольних точках схеми керування (локалізація до рівня функціонального блока) та режимів компонентів силової і сигнальної електроніки (локалізація до рівня компонента). Далі перевіряють функціонування приводу в динамічних режимах (пуску, реверсу гальмування, навантаження, розвантаження). Після виявлення несправного елемента (блока, агрегату, апарата, електричної машини) ЕП проводять його діагностування за структурними параметрами. Для електричних машин структурна діагностика полягає у проведенні операцій: вимірювання робочого зазору між статором і ротором, опору ізоляції обмоток якоря і збудження; перевірки під'єднання нейтралі; перевірки обмоток на відсутність замкнених витків та замикання на корпус; вимірювання зусилля натискання щіток колекторного вузла; перевірки осьових та радіальних люфтів вала ротора [4, 5].

В сучасних системах керування агрегатами автомобіля використовуються системи бортової самодіагностики на базі експертних програм, інтегрованих в основні керуючі алгоритми. Діагностична інформація в таких системах зчитується з бортового комп'ютера за допомогою діагностичних сканерів у вигляді кодів помилок, поточних значень режимних параметрів, еталонних значень параметрів із бібліотеки даних [6, 7]. Система самодіагностики здатна контролювати технічний стан елементів системи керування (периферійні пристрої), які безпосередньо підключені до електронного блока керування (ЕБК), але не дозволяє контролювати виконавчі пристрої, які мають гальванічну розв'язку з ЕБК, та спостерігати за об'єктом керування мехатронної системи.

Для контролю технічного стану обертових агрегатів транспортного засобу (ДВЗ, електродвигуни, пневмодвигуни, вузли та агрегати трансмісії) під час технічного обслуговування використовують методи, в яких інформацію про стан об'єкта діагностики отримують на підставі гармонійного аналізу (віброакустики, аналізу нерівномірності обертання вала) [8]. Завдяки високому рівню сучасної вимірювальної техніки, означені методи можуть використовуватися і для поточного контролю стану силових агрегатів автомобіля у транспортному режимі.

### Передумови досліджень та постановка задачі з діагностики електроприводу ГСУ

Силові кола ЕП гібридного автомобіля містять реактивні елементи, та в них відбуваються комутаційні процеси. Внаслідок цього в колах живлення виникають перехідні процеси, за характером зміни яких можна визначити технічний стан силової установки. Періодичність перехідних процесів у колах живлення ЕП створює передумови для гармонійного аналізу функцій зміни напруги і струмів, з метою локалізації пошкодженого елемента або монтажу електронної схеми, а також електромеханічної частини ЕП. До електронних пристроїв, що складають силову частину приводу, слід віднести перетворювачі постійної напруги, інвертори, випрямлячі. В механічній частині трансмісії використовують механічні перетворювачі обертового моменту.

Наявність реактивних компонентів (конденсаторів, АКБ, обмоток електричних машин та індуктивних реакторів) у схемі ЕП, з одного боку, спричиняє уповільнення перехідних процесів (інерційні ланки), з іншого – підвищує динаміку зміни електричних сигналів (диференційні ланки), залежно від режимів електричного кола, характеру навантаження та схемного підключення реактивних компонентів.

В системах електроприводу ГСУ на сьогодні передбачено датчики інтегральних параметрів (температури, середніх або діючих значень електричних сигналів), які характеризують загальний стан її силових елементів. Сигнали таких датчиків інформують систему керування про режимний стан елементів електроприводу, з метою оптимального перерозподілу потужності між приводними агрегатами ГСУ. При цьому отримана інформація не дозволяє ідентифікувати технічний стан елементів ЕП та локалізувати несправність. Для розв'язання цієї задачі необхідно мати систему моніторингу діагностичних параметрів, на підставі аналізу яких можна локалізувати несправність, забезпечити безаварійний режим, запобігати аварійному стану ГСУ та прогнозувати її залишковий ресурс.

Таким чином, для створення системи діагностики електроприводу ГСУ слід обґрунтувати вибір структурних і функціональних параметрів як діагностичних, обрати точки їх

контролю, визначити необхідну точність та однозначність вимірювань.

Як альтернативні діагностичні параметри розглядаються середні та миттєві значення напруги і струмів на виходах функціональних блоків ЕП під час функціонування ГСУ за різними схемами перерозподілу потужності по силових елементах та на всіх експлуатаційних режимах навантаження ГСУ.

На першому кроці досліджень постає задача – дати якісну оцінку електричних процесів, що відбуваються в колі живлення ЕП від висковольтної батареї (ВАБ), на предмет вибору діагностичних параметрів за критеріями чутливості, інформативності, стабільності та технологічності вимірювання [4–6].

### Аналіз структури об'єкта діагностики

Розглянемо функціональну структуру електроприводу гібридного автомобіля Lexus GS450h [2] з використанням вентиляційної машини GM, здатної працювати в режимах двигуна «М» і генератора «G» та за керуючі впливи сприймати положення педалі акселератора  $\alpha$  і обертання вала машини  $n$  (рис. 1). На схемі товстими суцільними стрілками позначено напрямки передачі потужності в режимі «М», товстими пунктирними – в режимі «G». Тонкі стрілки символізують керуючі сигнали, об'ємні – інформаційні. Контролер електричних машин (КЕМ) передає на КВН дані про силу струму на виході інвертора та його температуру. З КВН у КЕМ надходять дані для керування машиною MG. Вихідні напруги перетворювачів регулюються відповідними сигналами  $f_1$  і  $f_2$ . Потужність на виході інвертора та, відповідно, й електродвигуна керується сигналом  $f_3$  та сигналами комутації  $f_n$ , які формуються на підставі сигналу кутового положення ротора машини  $\omega$ . КВН спостерігає за рівнем зарядки ВАБ  $U_3$ , її температурою  $t^\circ$ . В КВН також надходить інформація про температуру електричних силових пристроїв і величину електричного навантаження ВАБ.

Рівень та величина пульсацій напруги на виході ППН залежать від величини навантаження (стану електродвигуна та інвертора). Несправності в електричному колі живлення окремої фази будуть викликати викривлення періодичної функції напруги, а пошкодження механічної трансмісії приводу – викривлення функції струму в колі живлення ВАБ.

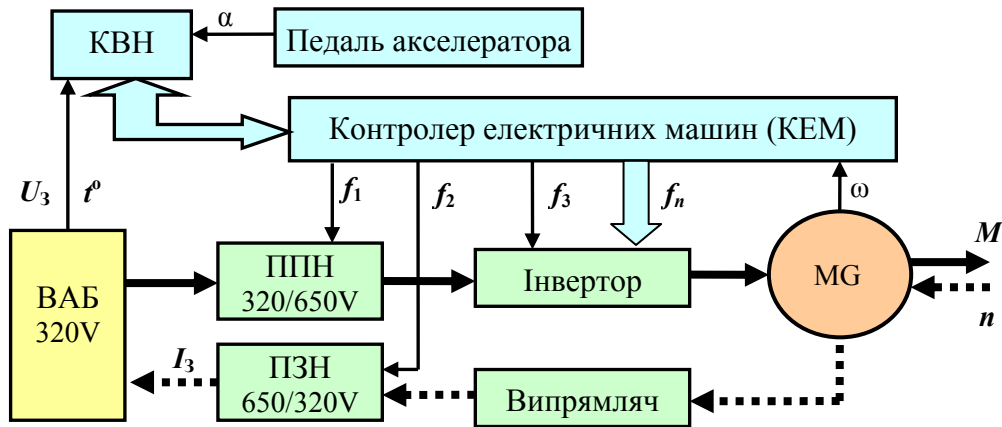


Рис. 1. Схема функціональна електричного приводу: КВН – контролер високої напруги; ВАБ – високовольтна акумуляторна батарея; ППН – перетворювач, що підвищує постійну напругу; ПЗН – перетворювач, що знижує постійну напругу

### Результати апробації імітаційної моделі

Для моделювання процесів у колах системи вентиляного двигуна побудовано імітаційну модель її схеми в пакеті прикладних програм «Matlab/Simulink» (рис. 2). Модель містить трифазну магнітоелектричну синхронну машину (Ventil Dvigatel), керовану від трифазного інвертора (IGBT Inverter), блок керування інвертором (PWM Generator) і перетворювач координат dq2abc [9]. Швидкість обертання приводу задається блоком Speed Ref, вимірювання змінних стану машини здійснюється універсальним блоком

Measurement, аналіз миттєвих значень електричних параметрів кола живлення – осцилоскопом «Strum i Napruga АКВ». В моделі не враховано вплив розподілених параметрів монтажу пристрою, розглядаються тільки режими електричного приводу та схема без імпульсного перетворювача постійної напруги ППН.

На рис. 3 наведено часові діаграми: фазного струму  $i_\phi$ , швидкості обертання ротора  $n$  та обертового моменту на валу  $M$  вентиляного двигуна; струму  $i_B$  і напруги  $u_B$  в колі живлення інвертора (високовольтної батареї).

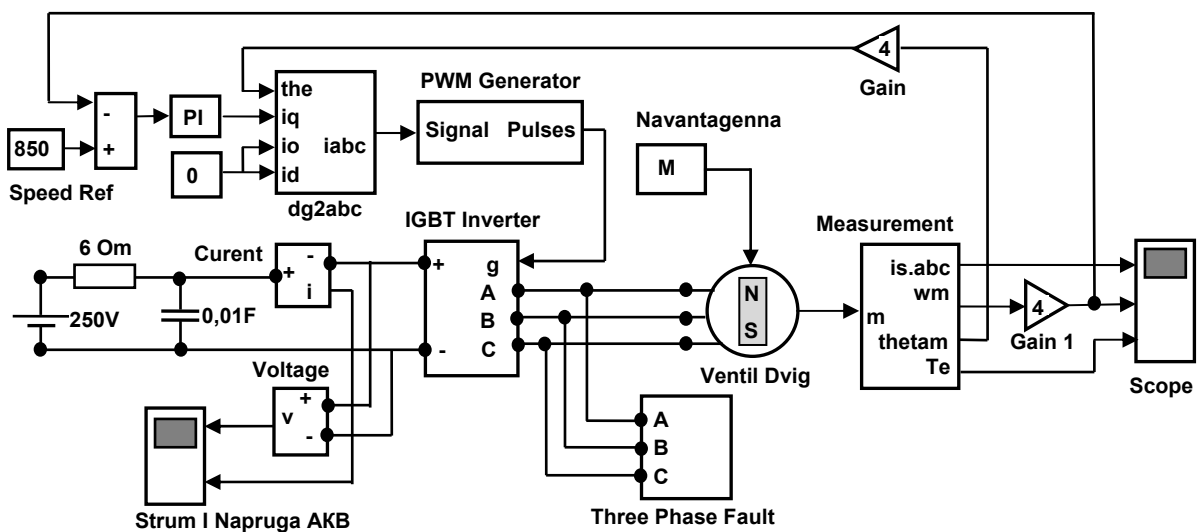


Рис. 2. Імітаційна модель системи вентиляного двигуна

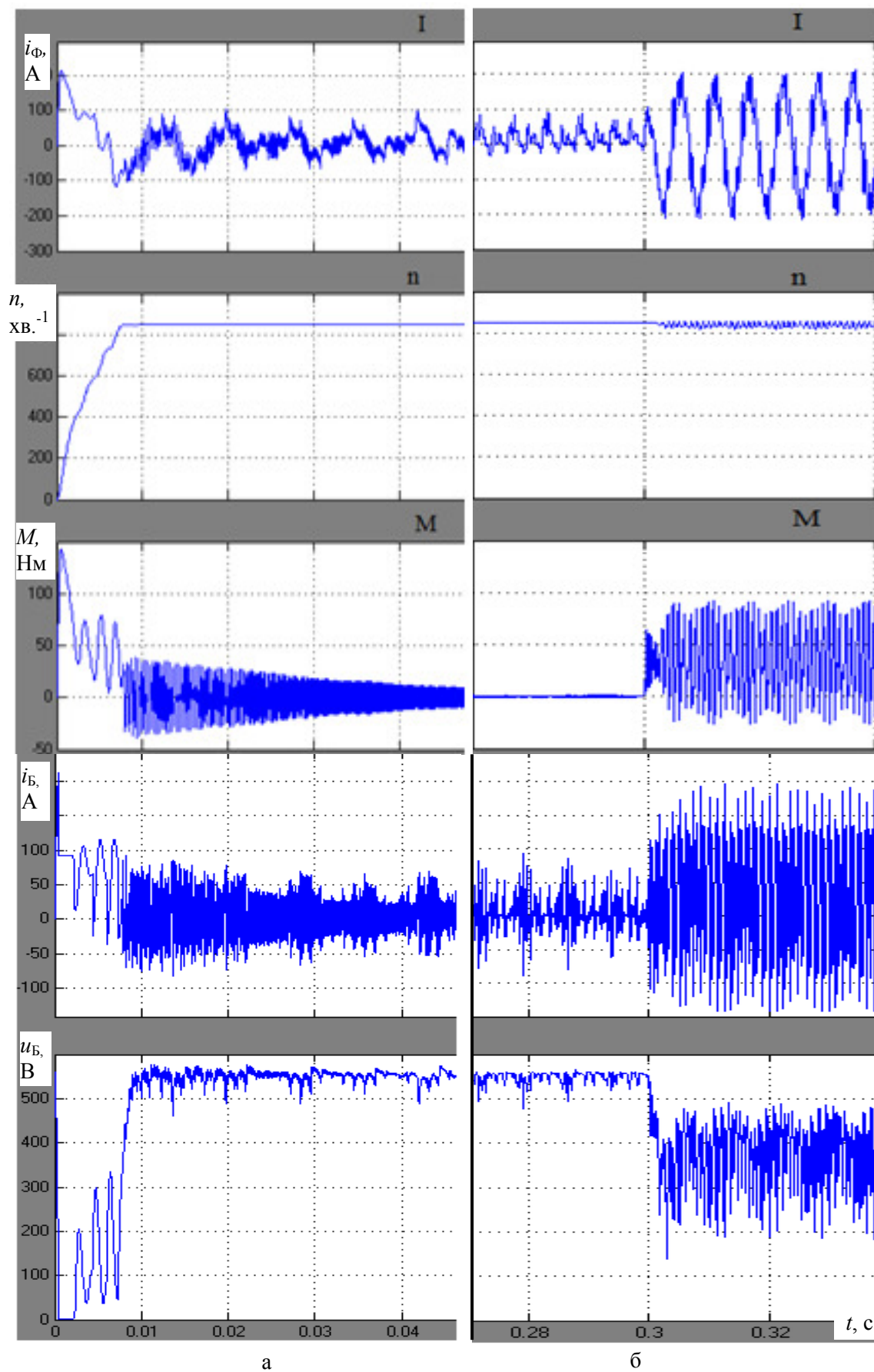


Рис. 3. Часові діаграми електромеханічних процесів приводу з вентильним електродвигуном: а – під час розгону без навантаження; б – при підключенні навантаження

Фрагментально суміщені діаграми дають уявлення про складність перехідних процесів у колах системи вентильного двигуна при різних режимах функціонування справної системи електропривода. Очевидно, що при виникненні несправностей в системі характер перехідних процесів буде змінюватись. До несправних станів системи, які не приводять до зупинки електропривода, але погіршують його характеристики, можна віднести: втрату ємності ВАБ і конденсатора фільтра; вихід ключів інвертора з режиму насичення; пробій окремих ключів; зростання перехідних опорів на монтажних з'єднаннях; міжвиткові замикання в обмотках електродвигуна; пробої силових кіл живлення на корпус та інші.

### Висновки

1. Аналіз осцилограм показує, що при проведенні тестування електропривода слід розглядати як сталі, так і перехідні режими функціонування електричних машин.
2. Під час вимірювання діагностичних параметрів для аналізу технічного стану ЕП необхідно мати інформацію про поточний режим навантаження ГСУ.
3. Функції зміни струмів та напруги характеризуються гармоніками, спричиненими комутацією ключів інвертора, частота якої становить сотні герц (рис. 3). Тому для вимірювання миттєвих значень напруги живлення та струму споживання слід обирати датчики з малим часом відгуку та лінійною функцією перетворення.
4. З боку чутливості до структурних змін у схемі (пошкоджень елементів) та параметричних відхилень (зміна номінальних значень) слід обирати як діагностичний параметри напруги або струму, залежно від режиму функціонування електропривода та точки вимірювання електричної величини.
5. Несправності в електричній та механічній частинах електропривода викликають зміну діючих значень сигналів та спектрального складу їх часових функцій. Тому для струк-

турної і параметричної ідентифікації технічного стану електропривода ГСУ доцільно застосовувати методи гармонійного аналізу.

### Література

1. Говорущенко Н.Я. Основные направления развития автомобильного транспорта в XXI веке / Н.Я. Говорущенко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2003. – Вып. 13. – С. 7–11.
2. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 328 с.
3. Скворцов В.А. Тенденции в развитии транспортных средств с использованием электропривода / В.А. Скворцов, А. Берестов // Силовая электроника. – 2004. – №1. – С. 85–87.
4. Чекалин В.Г. Диагностика и наладка автоматизированных электроприводов: учебное пособие для ВТУЗов / В.Г. Чекалин. – Душанбе: ТТУ им. М. Осими, 2011. – 211 с.
5. Осипов О.И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
6. Бороденко Ю.М. Диагностика электрообладнання АТЗ: навч. посіб. / Ю.М. Бороденко. – Х.: ХНАДУ, 2006. – 330 с.
7. Тюнин А.А. Диагностика систем управления двигателем легковых автомобилей: практич. пособие / А.А. Тюнин. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 352 с.
8. Баркова Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к статье: <http://vibrotek.com/russian/articles/sovrstost/index.htm>
9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – С.Пб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

Рецензент: В.Д. Мігаль, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 20 квітня 2012 р.