

**ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 681.518.54

**СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПО КОЛАХ
ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АВТОМОБІЛЯ**

Ю.М. Бороденко, к. ф-м. н., доцент, Є.В. Трішкин, магістрант ХНАДУ

***Анотація.** Розглянуто систему електроприводу з вентильним електродвигуном та побудовано її імітаційну модель в програмі Matlab/Simulink. Приведено результати моделювання електричних процесів в мережі живлення системи. Проаналізовано спектральний склад функції струму споживання на робочих режимах електродвигуна, як діагностичної інформації.*

***Ключові слова:** автомобіль, електропривод, вентильний електродвигун, високовольтна акумуляторна батарея, діагностичний параметр, імітаційна модель, спектральна характеристика.*

**СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ
ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ**

Ю.Н. Бороденко, к. ф-м. н., доцент, Е.В. Тришкин, магистрант ХНАДУ

***Аннотация.** Рассмотрена система электропривода с вентильным электродвигателем и построена ее имитационная модель в программе Matlab/Simulink. Приведены результаты моделирования электрических процессов в сети питания системы. Проанализирован спектральный состав функции тока потребления на рабочих режимах электродвигателя, как диагностической информации.*

***Ключевые слова:** автомобиль, электропривод, вентильный электродвигатель, высоковольтная аккумуляторная батарея, диагностический параметр, имитационная модель, спектральная характеристика.*

**SPECTRAL ANALYSIS OF ELECTRICAL PROCESSES IN THE POWER CHAINS
OF ELECTRIC CAR ENGINE**

**Y. Borodenko, associate professor, cand. phy.-mat. sc.,
E. Trishkyn, postgraduate, KhNAHU**

***Abstract.** Conceptual approach creation 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 electric motor as a diagnostic object has been carried out.*

***Keywords:** vehicle, electrical drive, brushless electrical motor, high-voltage accumulation battery, diagnostic parameter, virtual model, spectral characteristic.*

Вступ

Застосування електричної тяги на
автомобільному транспорті дозволяє

вирішувати проблеми, що пов'язані з поліпшенням його екологічних показників та паливної економічності. На сьогодні, розглядаються два основних напрямки розвитку концептів – застосування гібридних силових установок, в яких використовується допоміжний електродвигун, та використання цілком електричної тяги від акумуляторних джерел енергії [1...3].

Одним з аспектів розвитку автомобільних електроприводів (ЕП) є зниження експлуатаційних витрат під час їх експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. Такі задачі вирішуються на етапах розробки ЕП (адаптація конструкції, інтегрування діагностичних систем) і під час транспортного процесу (використання систем моніторингу технічного стану). Інформаційною основою означених систем є бази знань і даних для експертного аналізу [4, 5]. З цього приводу, в статті розглядається метод кількісної оцінки електричних процесів, що відбуваються в колі живлення ЕП на предмет використання отриманої інформації як діагностичної.

Аналіз публікацій

Електрична структура ЕП складається з інформаційної (датчики та контролери системи керування) і силових електричних (перетворювачі напруги, електричні машини) частин. Застосування інтегрованих систем самодіагностики здатні контролювати технічний стан елементів системи керування, які безпосередньо підключені до електронного блоку керування, але не дозволяють ідентифікувати несправності виконавчих пристроїв силових частин, які керуються дистанційно [6].

В [7] підкреслено актуальність проблеми, що пов'язана з дослідженням електричних

процесів по колах живлення електроприводу автомобіля, як діагностичної інформації і визначені передумови для гармонійного аналізу електричних процесів по силових колах системи ЕП з метою локалізації її несправності.

Перевірку силових електричних частин ЕП традиційно починають з контролю рівнів напруги всіх джерел живлення на холостому ході та під номінальним навантаженням у статичних режимах. Далі перевіряють функціонування приводу в динамічних режимах [8]. Вразі застосування вентильних електродвигунів (ВЕД) змінного струму з первинним джерелом постійного струму та інвертором напруги інформації про рівень (середнє значення) напруги або струму недостатньо, для ідентифікації несправності.

В [9] зроблено якісний аналіз процесів в системі вентильного двигуна на стаціонарних режимах без вторинного джерела живлення (перетворювача підвищеної напруги). В моделі системи використовувалася спрощена модель високовольтної акумуляторної батареї (ВАБ) у вигляді ідеалізованого джерела електрорушійної сили (ЕРС) з внутрішнім опором.

Побудування імітаційної моделі системи електроприводу

Силова частина системи електроприводу автомобіля складається з перетворювача підвищеної напруги, інвертора та синхронного електродвигуна з датчиками положення ротору [9]. Для підвищення напруги живлення в схемі перетворювача використовується реактор (індуктивність) в якому виникають імпульси ЕРС самоіндукції внаслідок комутації струму кола живлення (рис. 1).

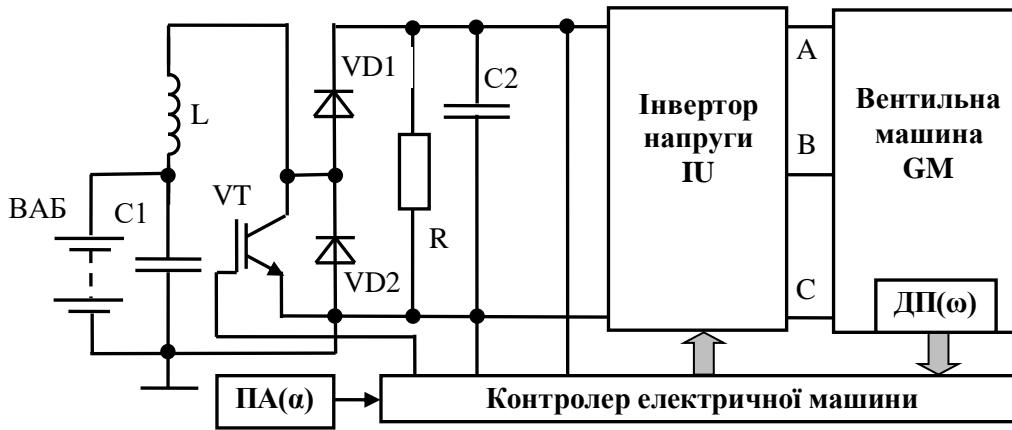


Рис. 1. Схема електрична приводу з вентиляним двигуном

Електродвигун приводу являє вентиляну машину GM зі збудженням від постійних магнітів та за керуючі впливи сприймає положення педалі акселератора $PA(\alpha)$ і сигнал зворотного зв'язку кутового положення валу машини $ДП(\omega)$. Контролер електричної машини формує імпульси керування ключами перетворювача підвищеної постійної напруги (L, VT, VD1, C2, R) та інвертора UI.

Період робочого циклу електричних процесів в схемі перетворювача визначається часом перемикання струму в реакторі L транзисторним ключем VT. Під час замкнутого стану ключа, до реактора підведена напруга нікель-кадмієвої ВАБ $UB = 250$ В під дією якої в колі виникає струм, що зростає з часом до сталого значення. На час розмикання ключа реактор індукуює імпульси ЕРС. Амплітуда імпульсів,

що утворюються внаслідок перехідних процесів, перевищує рівень підведеної до реактора напруги ВАБ. На виході схеми перетворювача включено інтегруючий конденсатор C2, який підтримує постійну напругу на рівні амплітудних значень 500 В. Діод VD1 виключає розряд конденсатора C2 через транзисторний ключ, під час його відчиненого стану. Діод VD2 захищає транзисторний ключ VT від імпульсних перенапруг. Буферний конденсатор C1 згладжує кидки напруги в колі живлення під час перехідних процесів.

Для проведення віртуальних досліджень побудована імітаційна модель системи ЕП в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink. Модель системи електроприводу складається з первинного джерела напруги Battery, системи ВЕД [7] та перетворювача підвищеної напруги (вторинного джерела живлення) (рис. 2).

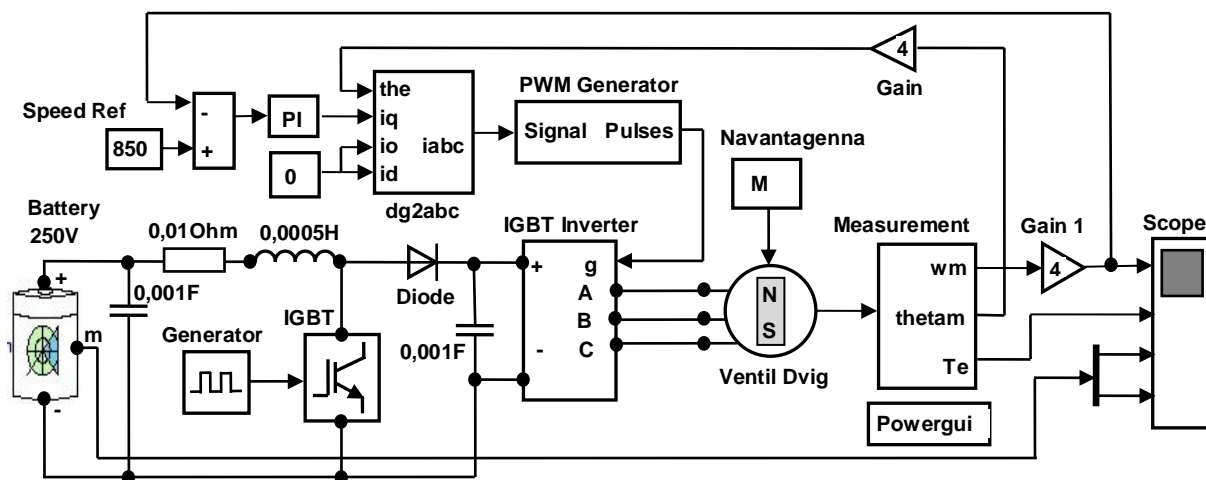


Рис. 2. Схема імітаційної моделі системи електроприводу з вентиляним двигуном

На відзнаку від попередніх досліджень моделі розглядається схема з перетворювачем підвищеної постійної напруги та використовується модель ВАБ, що враховує її енергетичну та умовну Фарадеївську ємності. У якості первинного джерела напруги обрано модель ВАБ (Battery) NiMH-типу з номінальною напругою $U_B=220$ В та номінальною ємністю $C_B=5$ А/год. Реактор L параметрується індуктивністю $L=0,5$ мГн та активним опором обмотки $r=0,01$ Ом. Блок Generator (генератор прямокутних імпульсів) імітує сигнал керування ключем IGBT, який в реальній системі надходить з контролера електричної машини. Підвищена напруга 500 В з перетворювача підводиться до інвертора IGBT Inverter в якому реалізується комутація фазних струмів вентильного двигуна Ventil Dvig. Підтримка заданої швидкості обертання електродвигуна під навантаженням (блок 850) здійснюється через схему порівняння Speed Ref поточної швидкості обертання валу двигуна з заданим її значенням.

В схемі моделі використана модель №12 вентильного електродвигуна, який розвиває

номінальний обертовий момент $M_N=35$ Нм при номінальній швидкості обертання $n_N=3000$ хв-1. Схема моделі системи електроприводу досліджується на стаціонарному режимі. При цьому параметри сигналу генератора (Generator) становлять: частота 20 кГц, амплітуда 3 В, шпаруватість 50%. Навантаження електродвигуна становить 37 Нм, підтримується швидкість обертання валу $n=850$ хв-1. Подача навантаження на електродвигун відбувається через 0,3 с. після його вмикання (функція реалізована в блоці Navantagenna). Дані пасивних елементів моделі перетворювача напруги відповідають значенням параметрів елементів схеми блоку перетворювачів напруги автомобіля Lexus RX400h.

Результати моделювання електричних процесів

За попередніми дослідженнями встановлено, що найкращим діагностичним параметром з боку інформативності, чутливості і технологічності вимірювання є гармонійний склад функції струму у колі живлення іб. Результати спостережень активованої моделі, показані на рис. 3.

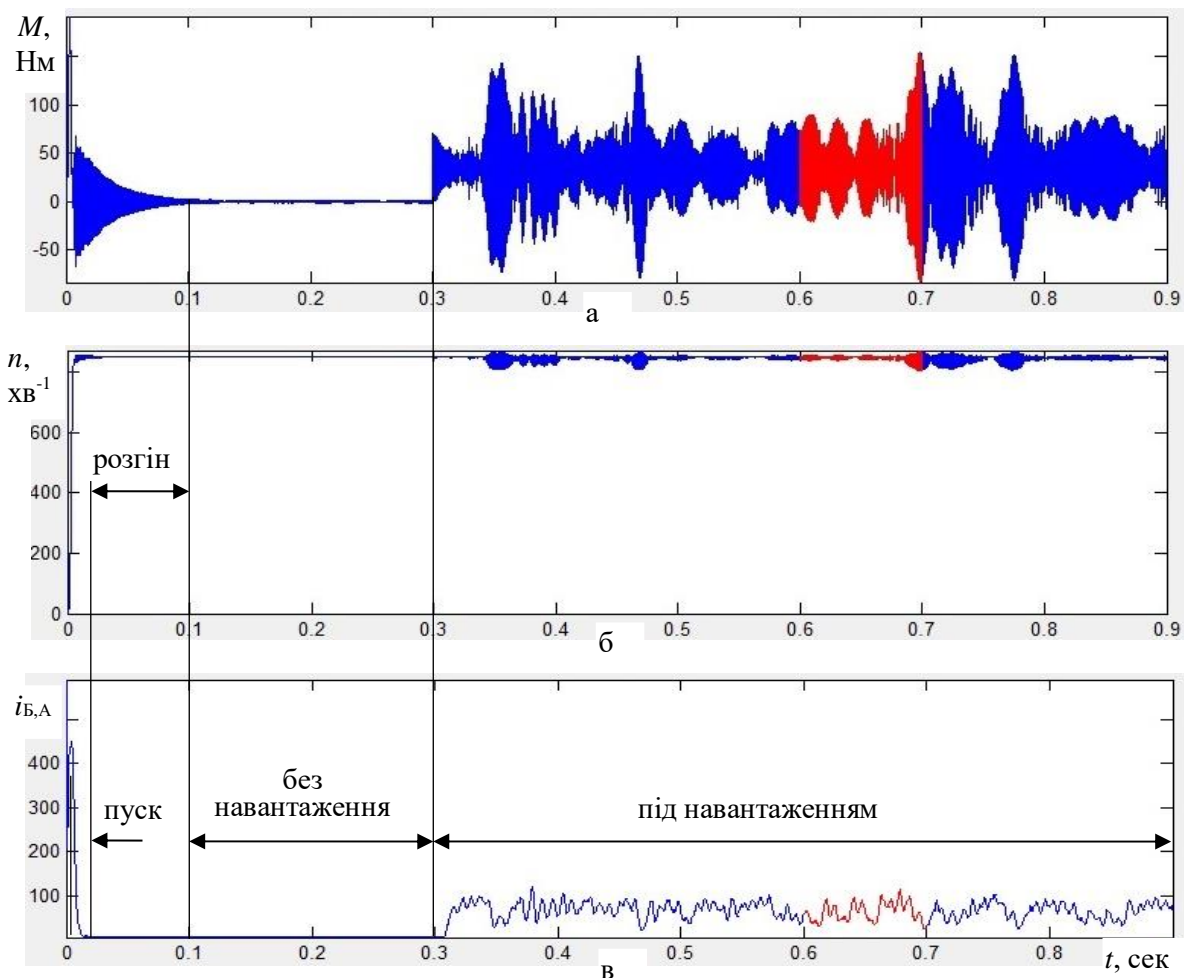


Рис. 3. Функції вихідних характеристик електроприводу: а – моменту на валу електродвигуна; б – швидкості обертання ротора; в – струму у колі ВАБ

Під час пуску двигуна після вмикання живлення $0 < t < 0,05$ с., обертовий момент M , що переборює сили тертя та інерційності маси ротору і струм i_b , мають максимальні значення. Помітний кидок струму споживання викликаний зарядом ємності конденсатора С1. Максимальні значення цього струму $i_b = 450$ А обмежуються тільки внутрішнім опором джерела живлення r_0 , а тривалість кидка – величиною ємності конденсатора С1.

Далі, за період часу $0,05 < t < 0,1$ с., обертовий момент поступово зменшується по мірі розгону ротору двигуна. Швидкість обертання ротору n , при цьому, зростає до постійних обертів холостого ходу. Часові функції цих механічних величин мають схожий коливальний характер, який з часом затухає. При фіксованій потужності електродвигуна означені періодичні функції зсунуті по фазі на пів періоду, а добуток їх миттєвих значень дорівнює механічній потужності на валу.

Після пуску та розгону ненавантаженого двигуна, в період часу $0,1 < t < 0,3$ с., на режимі холостого ходу, обертовий момент M практично дорівнює нулю, оберти ротору підтримуються постійними на заданому рівні ($n = 850$ xv^{-1}), а струм розряду батареї i_b має мінімальні значення на рівні одиниць ампер.

Після подачі навантаження на вал двигуна ($t > 0,3$ с.), кутова швидкість валу ротора має незначне коливання з частотою зміни миттєвих значень обертового моменту, діючи значення якого, визначаються моментом опору (заданим навантаженням). В сталому режимі під навантаженням відбуваються періодичні процеси обумовлені перемиканням транзисторних ключів інвертора (з частотою кратною швидкості обертання ротору електродвигуна) та перетворювача напруги (з частотою генератора Generator 20 кГц).

Аналіз спектрограм

Для визначених режимів електроприводу (ділянок функції i_b) проведено спектральний FFT-аналіз (метод швидкого перетворення Фур'є). Чутливість діагностичного параметру, в такому разі, визначається розбіжністю амплітуд та фазових зсувів окремих гармонік спектру для заданого режиму системи електроприводу, а інформативність – розбіжністю спектрограм обраного режиму для різних технічних станів (справного та несправних). Результати попередніх досліджень, з цього приводу,

показують, що для кожного режиму функціонування і технічного стану електроприводу слід обирати певні формати спектрограм. Для цього, в меню інструментарію Powergui вибирається режим FFT Analysis та налаштовуються опції аналізатору спектра (максимальна частота спостереження Max Frequency та базова частота відносного відліку амплітуди гармонік (Fundamental Frequency FF). Результати розкладу функцій за рядами Фур'є показані на рис. 4.

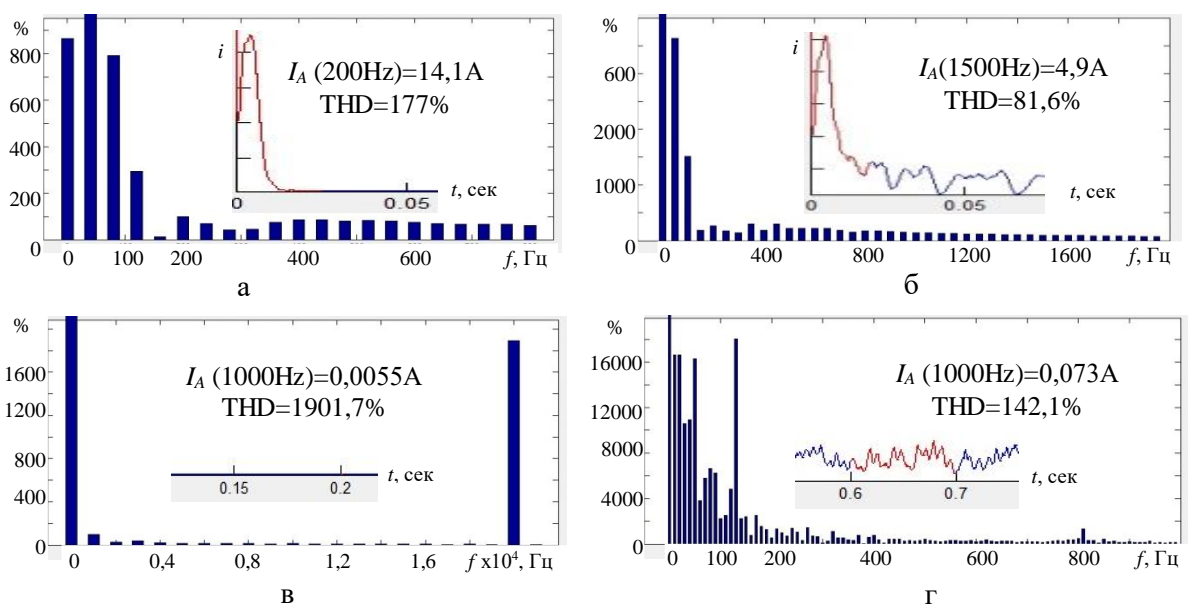


Рис. 4. Спектральні характеристики функцій струму у колі ВАБ на режимах вентиляного електродвигуна: а – пуску без навантаження; б – пуску під навантаженням; в – холостого ходу; б – стаціонарного навантаження

На рисунках позначено амплітуди базових гармонік $I_A(FF)$ і коефіцієнтів гармонік THD функцій струму на відповідних режимах. На осях ординат спектральних характеристик відкладено відсоток від величини 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.

Результати аналізу спектральних характеристик показують наступне. Характерними (інформативними) гармоніками для режимів пуску (рис. 4, а, б) є складові 40, 80 Гц. Згідно наведеної формулі, амплітуди цих гармонік відповідно дорівнюють $I_A(f_{40}) = 169,2$ А; $I_A(f_{80}) = 110$ А. Відхилення цих амплітуд або частот від нормованих значень непрямо свідчить про змінення значень електричних параметрів

кола живлення (несправність елементів ВАБ, С1, L). Постійна складова, при цьому, становить $I_{п.0} = 120$ А.

На холостому ході (рис. 4 в) домінуючою є гармоніка 20 кГц, амплітудою $I_A(f_{20000}) = 0,1$ А, спричинена перемикаваннями ключа перетворювача напруги. Постійна складова, в такому разі становить $I_{х.0} = 0,137$ А.

Під час функціонування приводу під навантаженням (рис. 4 г), помітно відокремлюється гармоніка 130 Гц з амплітудою $I_A(f_{130}) = 13,1$ А (постійна складова $I_{н.0} = 18,25$ А). Спектральний склад функції струму, при цьому, визначається конструктивними показниками електричної машини, схемним рішенням інвертора, режимними параметрами (M, n) та залежить від технічного стану елементів (електричних

кіл) інвертора та вентильного електродвигуна.

Слід зазначити, що змінні та постійні складові означених спектрограм мають однаковий прядок абсолютних значень струму, що говорить на користь чутливості обраного діагностичного параметра.

Висновки

Побудована модель адекватно імітує електричні процеси, які відбуваються в силових колах системи електроприводу з вентильним двигуном.

Спектральні характеристики функції струму розряду ВАБ дозволяють проводити якісну і кількісну оцінку пускових та потужнісних режимів електроприводу.

Спектральний склад функції струму живлення характеризується гармоніками, які спричинені комутацією ключів інвертора і перетворювача напруги та визначаються режимними параметрами електроприводу.

Склад домінуючих гармонік в спектрограмах залежить від конструктивних показників електродвигуна та схемного рішення інвертора напруги.

Для підвищення інформативності спектрограм доцільно використовувати різні формати FFT аналізу.

В подальшому розроблена модель може бути використана для віртуальних досліджень динамічних режимів електроприводу та досліджень пов'язаних з ідентифікацією структурних і параметричних несправностей, що виникають в його колах.

Література

1. Говорущенко Н.Я. Основные направления развития автомобильного транспорта в XXI веке. / Н.Я. Говорущенко // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2003. УДК 621.313.333

- Вып. №13. – С 7-11.
2. Гібридні автомобілі / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатюк А.В. та ін. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
 3. Скворцов В.А. Тенденции в развитии транспортных средств с использованием электропривода. / В.А. Скворцов, А. Берестов. // Силовая электроника. – №1. – 2004. – С. 85 – 87.
 4. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1987 г. – С. 34 – 53.
 5. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы: М. Наука, 2004 г. – С. 24 – 28.
 6. Бороденко Ю.М. Диагностика электрообладнання АТЗ. Навчальний посібник. / Ю. М. Бороденко. – Харків : ХНАДУ, 2006. – 330 с.
 7. 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.
 8. Чекалин В.Г. Диагностика и наладка автоматизированных электроприводов. Учебное пособие для ВТУЗов / В. Г. Чекалин. – Душанбе: ТТУ им. М. Осими, 2011. – 211с.
 9. 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.

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

Стаття надійшла в редакцію 20.10.2015

СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕННЯ КОНВЕРСИОННОГО ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ