

**ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. ЭНЕРГОСБЕ-
РЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 681.518.54

**АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ,
ЯК ОБ'ЄКТУ ДІАГНОСТИКИ**

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

***Анотація.** Розглянуто структуру та режими функціонування гібридної силової установки з електроприводом. Визначено спосіб апаратної реалізації та сформульовано загальні правила обробки інформації системи моніторингу технічного стану силової частини електроприводу на прикладі гібридного силового агрегату типу THS II.*

***Ключові слова:** гібридна силова установка, електропривод, вентильна машина, високовольтна акумуляторна батарея, перетворювач напруги, система моніторингу.*

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ,
КАК ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ**

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

***Аннотация.** Рассмотрена структура и режимы функционирования гибридной силовой установки с электроприводом. Определены способ аппаратной реализации и общие правила обработки информации системы мониторинга технического состояния силовой части электропривода на примере гибридного силового агрегата типа THS II.*

***Ключевые слова:** гибридная силовая установка, электропривод, вентильная машина, высоковольтная аккумуляторная батарея, преобразователь напряжения, система мониторинга.*

**ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF ELECTRIC HYBRID VEHICLE AS THE OB-
JECT OF DIAGNOSIS**

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

***Abstract.** The structure and modes of operation of a hybrid power setting with an electric drive are considered. Defined way to hardware implementation and general rules of information processing system for monitoring of technical condition of the power part of the actuator on the example of a hybrid type power unit THS II.*

***Keywords:** hybrid power setting, electrical drive, brushless machine, high-voltage battery, voltage converter, the monitoring system.*

Вступ

Попит на автомобілі з електричним приводом зростає, актуальність проблем, що пов'язані з їх обслуговуванням підвищується. Зниження експлуатаційних витрат на технічне обслуговування електричних концептів можливо за рахунок удосконалення засобів

та методів діагностики. Такі задачі вирішуються шляхом адоптації конструкції приводу автомобіля до процедури контролю в умовах діагностичного поста та використання інтегрованих діагностичних систем, які відслідковують технічний стан його вузлів і агрегатів під час транспортного процесу.

Діагностичні системи реалізуються, як експертні, з використанням баз даних зразкових та поточних значень діагностичних параметрів. Поточні значення отримують шляхом їх моніторингу. Після експертної оцінки система інформує водія (оператора) про результати перевірки та приймає рішення про технічні впливи на привод. Утворена у такий спосіб система виконує активні функції інтегрованої діагностики.

Аналіз публікацій

З позицій технічної діагностики електропривод (ЕП) транспортного засобу, що входить до складу гібридної силової установки (ГСУ), розглядається як складна діагностична модель зі змінною структурою.

Задачами технічної діагностики в класичній постановці є вивчення конкретних технічних об'єктів (систем), дослідження їх структури і параметрів з метою побудовання ідеалізованих моделей для визначення діагностичних тестів та побудовання алгоритмів діагностування [1]. При цьому, виконують наступне: вивчають функціонування системи в справному стані; поділяють систему на окремі блоки та встановлюють зв'язки між ними; визначають можливі несправні стани системи; аналізують технічні можливості контролю діагностичних параметрів.

Система моніторингу діагностичних параметрів являє програмно апаратні засоби збору і опрацювання інформації про технічний стан об'єкту діагностики в період його експлуатації. З цього приводу в [2] визначено актуальність проблеми, що пов'язана з дослідженням електричних процесів по колах живлення електроприводу автомобіля, як діагностичної інформації. Означені передумови для гармонійного аналізу цих процесів з метою локалізації несправності. Приводяться результати апробації імітаційної моделі електроприводу з вентильним двигуном в програмі Matlab/Simulink, які свідчать про доцільність обраного метода діагностики.

Результати попередніх досліджень [3, 4] показують, що вимогам, які висуваються до діагностичного параметру з боку інформативності, чутливості та технологічності вимірювання, найбільш задовольняє параметр у вигляді миттєвих значень струму розряду первинного джерела живлення, який носить періодичний характер.

В [5, 6] проведено дослідження моделей систем ЕП (статус двигуна) та енергетичної установки (статус генератора) шляхом спектрального аналізу функції струму в колі високовольтної акумуляторної батареї (ВАБ). Дослідження проводились на режимах пуску, холостого ходу і стаціонарних навантажень при імітації пошкоджень систем в частині DC/DC перетворювачів напруги. Вигляд спектрограм, отриманих за результатами моделювання, виправдовує напрямок досліджень.

Мета досліджень та постановка задачі

На різних транспортних режимах в ГСУ передбачається виконання декількох активних функцій діагностики: аварійне відключення електроживлення під час пуску ЕП; тестування ЕП на режимі холостого ходу; перерозподіл потужності між силовими агрегатами ГСУ під час транспортного процесу.

Щоб побудувати систему моніторингу обраних параметрів, необхідно виділити елементи (ланки), що утворюють ланцюг передачі потужності в кожному режимному статусі ГСУ, визначити параметри контролю та сформулювати правила обробки інформації (скласти алгоритм експертної оцінки). Це дозволить ідентифікувати ланки, які призводять до відхилень спектральних характеристик (поточних даних) від зразкових (бази даних за технічними станами).

Функціональна структура ГСУ

Центральним блоком системи керування силовою установкою гібридного автомобіля з електроприводом є контролер кола високої напруги (КВН). Контролер здійснює розподіл потужності по силових агрегатах установки, забезпечуючи оптимальне використання потужностей електроприводу та ДВЗ для утворення необхідного обертаючого моменту на колесах автомобіля під час його прискорення та рекуперації енергії при гальмуванні.

Електромеханічна частина силової установки складається з гібридної коробки передач (ГКП), блоку перетворювачів напруги (БПН) та блоку високовольтної батареї БВБ (рис. 1). Високовольтна батарея є основним джерелом електричної енергії для живлення тягового електродвигуна та низьковольтних споживачів, включаючи низьковольтну батарею під час її зарядження. Блок перетворювачів напруги узгоджує номінальні напруги високовольтної батареї та електричної машини.

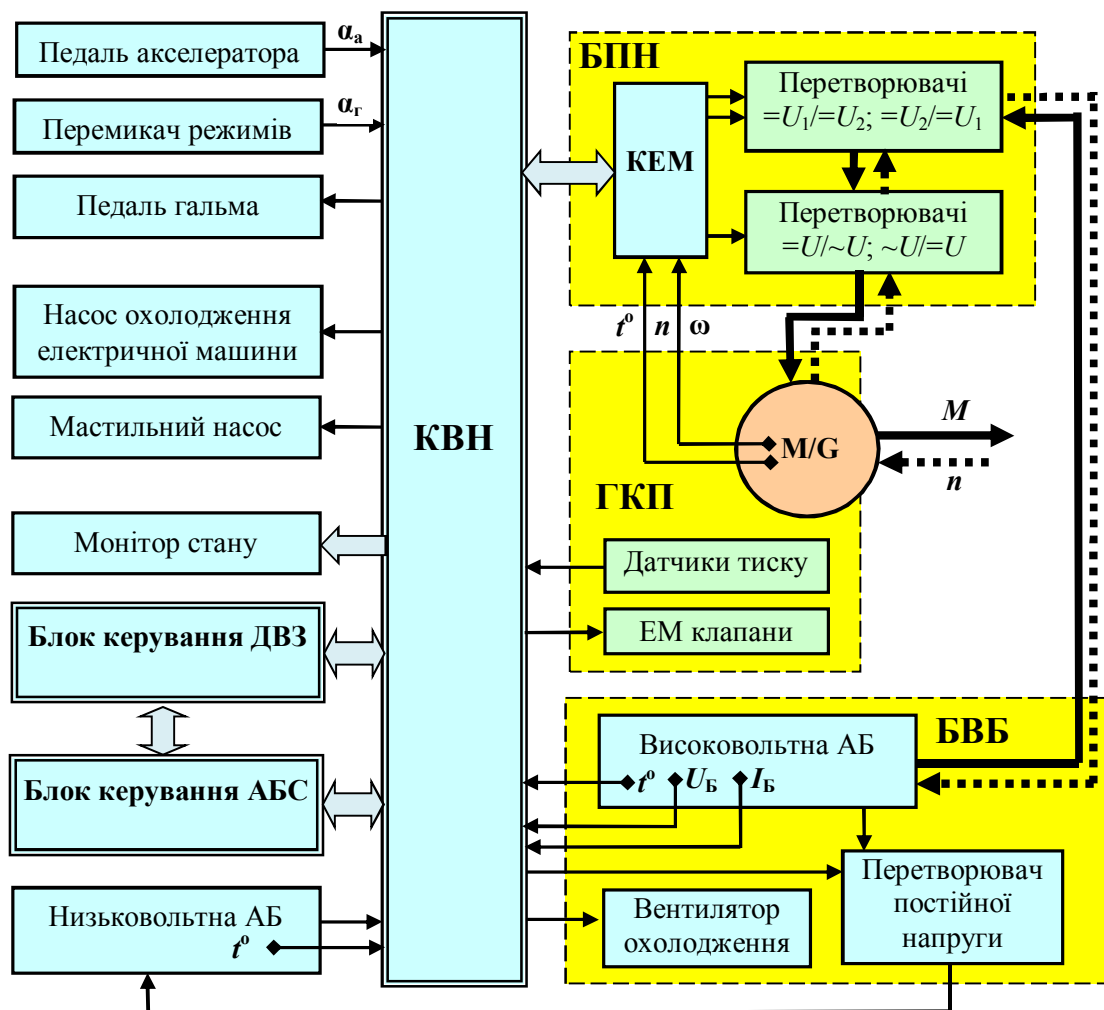


Рис. 1. Схема структурна системи керування силовою установкою

Гібридна коробка передач являє електро-механічну трансмісію потужності подвійної дії з електрогідравлічним керуванням її механічної частини. Вентильна машина, яка входить до складу ГКП функціонує в режимах (статусах) двигуна «М» або генератора «Г» залежно від дій водія та дорожньої ситуації.

В статусі «М» електрична потужність, що підводиться до електродвигуна від високовольтної батареї (ВАБ) перетворюється в БПН за допомогою DC/DC перетворювача підвищеної напруги ($=U_1/=U_2$) та трьох-фазного інвертора ($=U/\sim U$). При цьому, робочі режими перетворювачів напруги (рівень напруги, значення струму і частота комутації інвертора) та відповідно і електродвигуна (обертний момент і частота обертання) визначаються на підставі сигналів датчиків положення педалі акселератора α_a та кутового положення валу машини ω , які надходять в контролер електричної машини КЕМ.

Під час рекуперації енергії в режимі «Г» від-

бувається зворотне перетворення механічної потужності обертання ротору електричного генератора в електричну потужність зарядження ВАБ. В цьому статусі в силовому колі ЕП задіяні – трьох-фазний випрямляч ($\sim U/=U$) та DC/DC перетворювач пониженої напруги ($=U_2/=U_1$). Режим зарядження ВАБ на кожен мить процесу гальмування розраховується в КВН на підставі інформації, яка надходить з датчиків системи АБС та педалі гальм α_r .

Якщо режим руху автомобіля та дії водія зумовлюють активізацію гібридного приводу, контролер КВН визначає їздовий статус автомобіля і здійснює регулювання моментів ДВЗ і тягового електродвигуна з урахуванням рівня зарядки високовольтної батареї (напруги U_B та струму I_B у колі заряду ВАБ) і її температури t^o . Різниця між потрібною потужністю руху та потужністю ДВЗ компенсується потужністю електричного двигуна. Додатково може використовуватись інфор-

мація про температурний стан електричної машини, інвертора і випрямляча яка непрямо характеризує технічний стан цих агрегатів. При цьому КВН керує вентилятором системи охолодження ВАБ і зарядженням низьковольтної батареї відповідно до її температури, використовуючи перетворювач постійної напруги.

Розподіл потужності по силових колах електроприводу

Елементи ГСУ автомобілів окремих виробників складають різну схемну композицію. В легкових автомобілях Honda (Insight, Civic Hybrid, Accord Hybrid) використовується послідовна схема. Toyota (Camry Hybrid, High-

lander Hybrid, Prius, Lexus RX400h, Lexus GS450h) та Ford (Escape Hybrid, Mercury Mariner Hybrid) використовують змішану схему. У системі використовується, принаймні, дві електричні машини. Одна функціонує як генератор електричного струму, друга – як тяговий двигун і стартер для ДВЗ. Обидві машини можуть використовуватися одночасно, економлячи заряд акумуляторної батареї [7].

В силевій установці THS II автомобіля Lexus GS450h основними компонентами блоку перетворювачів напруги (постійної VT1 і VT2, випрямлячів VD1.6 і VD2.6, інверторів VT1.6 і VT2.6) є транзистори комбінованої структури з захисними діодами (рис. 2).

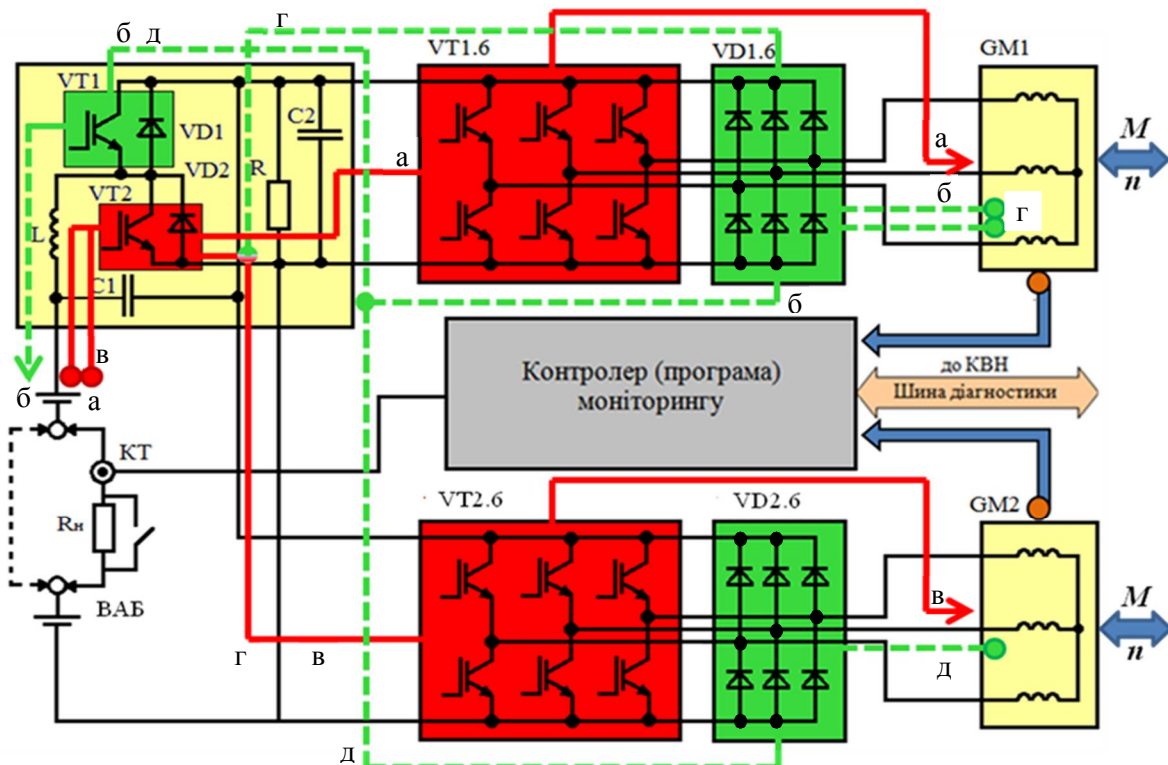


Рис. 2. Схема силових кіл електричного приводу ГСУ

В режимі підвищення постійної напруги, частото-імпульсна комутація струму (ключ VT2) в реакторі L під напругою ВАБ – 288 В приводить до індукування на колекторі VT2 імпульсів напруги. Діод VD1 запобігає їх інверсній дії. Конденсатор C2, при цьому, заряджається до амплітудного рівня та підтримує постійну напругу 650 В на виході перетворювача.

В режимі зниження постійної напруги, комутація струму (VT1) під випрямленою напру-

гою генератора 650 В викликає індуктивний опір реактора L та зниження середнього значення струму заряду ВАБ через ключ VT1. Конденсатор C1 при цьому заряджається до рівня постійної напруги зарядження ВАБ (близько 288 В).

Електрична машина GM1 в режимі генератора приводиться в дію ДВЗ, при цьому виробляється електрична потужність, призначена для зарядки ВАБ і для живлення тягового електричного двигуна GM2 у складі гібрид-

ної трансмісії. Електрична машина GM1 в режимі двигуна використовується як стартер під напругою 650 В для пуску ДВЗ. Електрична машина GM2 в режимі двигуна служить джерелом допоміжного моменту на колеса автомобіля. В режимі генератора електрична машина GM2 працює у складі рекуперативного гальма, перетворюючи гальмівну кінетичну енергію автомобіля в електричну енергію, яка акумулюється у ВАБ.

Задні колеса і електрична машина GM2 зв'язані карданним валом і не розділені зчепленням. Щоб припинити передачу обертового моменту на задні колеса при нейтральному положенні селектора, по сигналу датчика селектора режимів в нейтральному положенні вимикаються всі силові транзистори, які керують роботою електричних машин MG. В результаті, робота GM1 і GM2 припиняється і обертовий момент на задніх колесах стає рівним нулю.

Побудування системи моніторингу

Для побудування системи моніторингу треба вирішити питання пов'язані з апаратною реалізацією системи та її програмним забезпеченням, що дозволить підтримувати оптимальні режим та послідовність реєстрації значень діагностичних параметрів.

Апаратна реалізація системи моніторингу полягає у введенні в коло живлення (техно-

логічну перемичку) контрольної точки «КТ» з датчиком струму та застосуванні контролера, який буде обробляти інформацію про поточні (миттєві) значення струму в колі ВАБ (див. рис. 2). З метою підвищення чутливості діагностичного параметра, до кола ВАБ додають навантажувальний резистор R_H , забезпечуючи послаблення її потужності на час тест-контролю.

По шині діагностики, інформація надходить у двох напрямках. Від контролера КВН поступає інформація для ідентифікації поточного режиму ГСУ. До контролера КВН, за результатами моніторингу, надходять команди, які інформують водія про технічний стан елементів ГСУ та забезпечують аварійні режими системи керування вразі відхилення діагностичних параметрів від їх допустимих значень. Таким чином мінімізуються негативні наслідки пошкоджень елементів системи керування ГСУ або її механічних вузлів.

Щоб апаратно не відокремлювати контролер моніторингу, його функції можна передати безпосередньо контролеру КЕМ або КВН.

Аналізуючи функціонування ГСУ в транспортних режимах, можна упорядкувати агрегати, що утворюють ланцюг передачі енергії та розглядати цей ланцюг, як об'єкт діагностики. На рис. 3 показано послідовність елементів передачі енергії за п'ятьма транспортними режимами функціонування ГСУ.

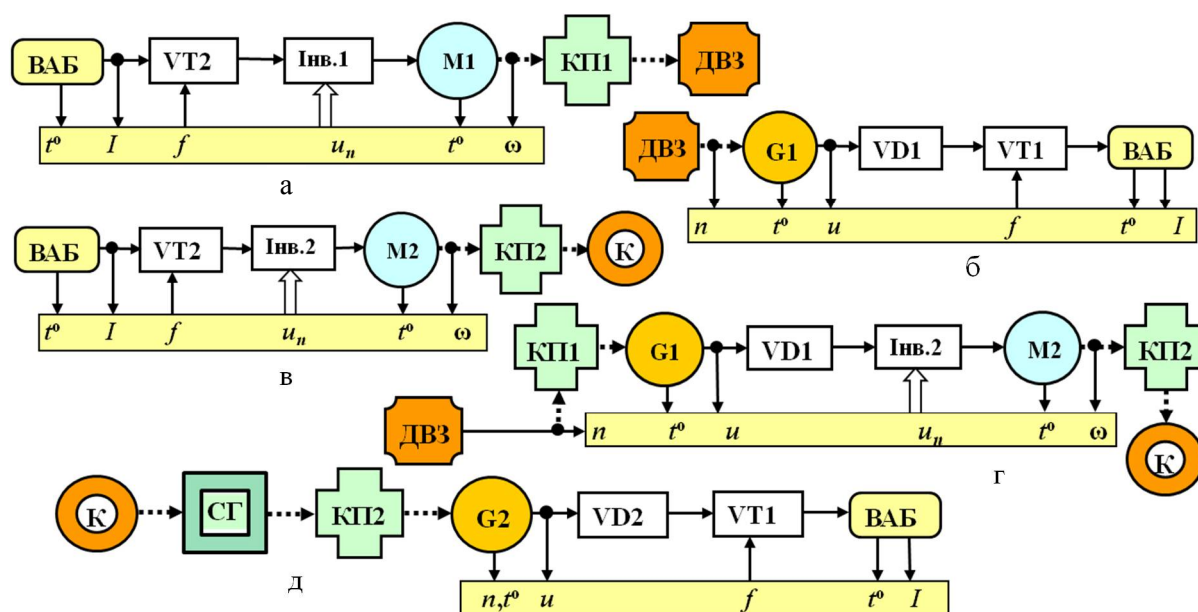


Рис. 3. Схеми ланцюгів передачі потужності за режимними статусами ГСУ: а – пуск ДВЗ; б – заряд високовольтної батареї від ДВЗ; в – електропривод автомобіля; г – послідовна робота ДВЗ та електричного двигуна; д – рекуперативний заряд батареї

На схемах рис. 3 позначено механічні ланки передачі потужності: К – колесо, СГ – система гальмування, КП1/КП2 – трансмісія, яка понижує/підвищує. У вимірювальні кола контролерів КВН та КЕМ надходить інформація від елементів силового кола: n – частота обертання; t° – температура агрегатів; u_n – імпульси керування інверторами; u – вихідна напруга; f – частота керуючих імпульсів; I – середнє значення струму у колі заряду батареї; ω – кутове положення роторів електричних машин. Додатково може використовуватись інформація про температурний стан інверторів і випрямлячів, яка непрямо характеризує технічний стан цих елементів. Слід

відзначити, що сигнали, які надходять з відповідних датчиків температури є інерційними і тому не дозволяють швидко відслідковувати аварійні ситуації в системі і своєчасно активізувати аварійні режими.

У відповідності з режимними статусами (див. позиції рис. 3) на рис. 2 кольоровими стрілками показано напрямки потоків потужності по силовим колам ЕП.

Таким чином, згідно режимним статусам можна скласти ідентифікаційну структуру (визначення транспортної ситуації) для перевірки електричних елементів ГСУ (табл. 2).

Таблиця 2. Структурна ідентифікація електричних елементів ГСУ

| Позн. (рис. 3) | Функціональний блок (позначення рис. 2) | Режимні статуси ГСУ (рис. 3) | | | | |
|-------------------|---|------------------------------|---|---|---|---|
| | | а | б | в | г | д |
| VT1 | Перетворювач пониженої напруги (VT1) | - | + | - | - | + |
| VT2 | Перетворювач підвищеної напруги (VT2) | + | - | + | - | - |
| VD1 | Випрямляч GM1 (VD1.6) | - | + | - | + | - |
| VD2 | Випрямляч GM2 (VD2.6) | - | - | - | - | + |
| Інв.1 | Інвертор GM1 (VT1.6) | + | - | - | - | - |
| Інв.2 | Інвертор GM2 (VT2.6) | - | - | + | + | - |
| M1 | Машина GM1 у режимі двигуна | + | - | - | - | - |
| M2 | Машина GM2 у режимі двигуна | - | - | + | + | - |
| G1 | Машина GM1 у режимі генератора | - | + | - | + | - |
| G2 | Машина GM2 у режимі двигуна | - | - | - | - | + |
| ВАБ | Високовольтна батарея | + | + | + | - | + |

Слід відзначити, що силові агрегати перетворювачів напруги VD1, VD2, VT1, VT2, Інв.1, Інв.2 залишаються без контролю системи діагностики. Крім того, в статусі послідовного гібрида (див. рис. 3, г), ВАБ зовсім не задіяна в ланцюзі передачі енергії але вона ідентифікується в інших статусах.

Під час функціонування ГСУ в кожному режимному статусі можна розглядати різні транспортні режими. Так, в режимному статусі електроприводу можна відокремити транспортні режими: зрушення, холостого ходу, розгону, руху при стаціонарних навантаженнях, уповільнення [4, 5].

Для ідентифікації транспортної ситуації (визначення поточного статусу ГСУ і режимного стану ЕП) треба знати поточні статуси органів керування і режимні параметри ЕП. Так, для ситуації в статусі ЕП важливо отримати інформацію про положення селектора режимів, швидкість обертання ротору та навантаження вентильного електродвигуна. Як додатковий параметр, може розглядатися

частота керування перетворювачем підвищеної напруги.

Зауважимо, що в ланцюгах передачі потужності від джерела енергії до кінцевого споживача (робочого органу) є механічні ланки (див. рис. 3), які впливають на електричні процеси в електромеханічних перетворювачах енергії.

Відомо, що величина моменту опору на валу електричного двигуна визначає силу струму, що їм споживається, а величина напруги вироблена генератором пропорційна швидкості обертання його ротору. Такі залежності складають передумови для діагностики стану механічних вузлів шляхом спектрального аналізу функції струму споживання чи навантаження за оберт валу електричної машини.

Забезпечення активних функцій системи інтегрованої діагностики передбачає програмні втручання в алгоритми керування ЕП. Такі втручання можна реалізувати або шляхом застосування окремого контролера та вико-

навчих пристроїв, або шляхом поновлення програмного забезпечення штатних контролерів КВН і КЕМ.

Висновки

Для реалізації системи моніторингу технічного стану і інтегрованої системи діагностики ЕП, необхідно ідентифікувати поточну транспортну ситуацію (структуру і режими) для ГСУ і вимірювати миттєві значення струму у колі ВАБ.

Режимний статус ГСУ і поточний транспортний режим функціонування ЕП доступно визначити на підставі інформації зі штатних датчиків системи керування ГСУ.

Апаратна реалізація каналу вимірювання діагностичних параметрів в масштабі реального часу передбачає застосування тільки одного датчика струму у колі ВАБ.

Система моніторингу струму у колі ВАБ дозволяє локалізувати несправність до рівня функціонального блоку та його компонентів.

Системи моніторингу і діагностики можуть бути реалізовані з різним ступенем інтеграції (використання штатних або додаткових контролерів).

Література

1. Основы технической диагностики. – Кн.1. (Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза) / Ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
2. Бороденко Ю.М. Концепція діагностики електроприводу гібридного автомобіля / Ю.М. Бороденко, А.В. Черевач. // Авто-

мобильный 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.
5. Бороденко Ю.М. Ідентифікація несправностей електроприводу автомобіля з вентиляним двигуном. // Весник ХНАДУ. Харьков: ХНАДУ, 2016. – вып. № 72. – С. 13 – 18.
6. Бороденко Ю.М. Ідентифікація несправностей енергетичної установки гібридного автомобіля // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2016. – №9. – С. 27 – 31.
7. Гібридні автомобілі / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В. та ін. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.

Рецензент: О.В. Бажинов, професор, д.т.н., ХНАДУ.