

Шифр: «Система моніторингу»

ПОБУДУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕК-
ТРОПРИВОДУ АВТОМОБІЛЯ

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Постановка задачі та метод дослідження.....	4
1.2 Передумови побудування системи моніторингу.....	4
1.3 Аналітичний огляд.....	5
1.4 Структура дослідження.....	6
2 Характеристика об'єкту моніторингу.....	8
2.1 Структура електроприводу автомобіля.....	8
2.2 Методи та способи керування електродвигуном.....	10
2.3 Кола живлення електричної машини.....	12
3 Моделювання системи електроприводу в Matlab	14
3.1 Синтез моделі системи з ідеальним джерелом живлення.....	14
3.2 Апробація ідеалізованої моделі системи в експлуатаційних режимах....	15
3.3 Синтез і апробація моделі перетворювача напруги постійного струму...	16
3.4 Побудування і апробація моделі системи з перетворювачем напруги....	18
4 Результати досліджень діагностичної моделі.....	21
4.1 Спектральний аналіз електричних процесів справної системи.....	21
4.2 Моделювання несправних станів системи.....	23
4.3 Структурна ідентифікація пошкоджень компонентів системи.....	25
Висновки.....	28
Перелік посилань.....	29

ВСТУП

Жорсткі вимоги, щодо екологічних показників та паливної економічності автотранспортних засобів спонукали застосування на транспорті електричної тяги. Поряд з традиційним електротранспортом, провідні автомобілебудівники пропанують для автомобілів гібридні силові установки з електроприводом (ЕП) та автомобілі з цілком електричною тягою [1].

Одним з аспектів розвитку автомобільної індустрії, що визначає *актуальність* теми даної роботи, є зниження експлуатаційних витрат на технічне обслуговування і ремонт транспортних засобів в ЕП, за рахунок удосконалення засобів і методів діагностики [2]. Такі задачі вирішуються, як на етапі розробки силової установки (інтегрування діагностичних систем), так і під час транспортного процесу (використання систем моніторингу технічного стану).

Моніторинг в загальному розумінні визначає сукупність спостережень протягом певного часу, спрямована на встановлення фактичного стану предмета дослідження з метою регулювання його якостей. Моніторинг характеризується адресністю і предметною спрямованістю (застосовується до конкретних об'єктів для вирішення конкретно поставлених завдань) [3]. Щодо технічних систем можна розглядати два аспекти моніторингу, які пов'язані або з процесом керування об'єктом, або з визначенням його технічного стану. У другому випадку, як індикаторні, розглядаються діагностичні параметри, що визначають ступінь справності системи.

Апаратна частина системи моніторингу являє інформаційно-вимірювальний комплекс, що складається з вимірювальних каналів (датчиків), пристроїв обробки і засобів відображення інформації. Інформаційною основою систем моніторингу є бази знань і даних для експертного аналізу [4]. З цього приводу, в роботі розглядаються методи кількісної оцінки параметрів електричних процесів в колі живлення ЕП на предмет використання отриманої інформації як діагностичної.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Мета дослідження

Електропривод (ЕП) транспортного засобу складається з електронної (керуючої та силової), електричної (кола обмоток машин та апаратів) та механічної (трансмсії) частин і розглядається як складна діагностична модель для різних експлуатаційних режимів (пуск, холостий хід, розгін, стаціонарний режим робочих навантажень, скидання потужності). Несправності такої системи можуть бути викликані і виходом із строю електронних компонентів, і руйнуванням елементів електричних кіл, і зносом механічних частин.

Система моніторингу технічного стану ЕП є основною складовою діагностичної системи, яка забезпечує потік інформації про стан ЕП (поточні значення діагностичних параметрів).

Кінцевою метою дослідження в даному напрямку є створення інтегрованої діагностичної системи для оперативного визначення технічного стану силової установки автомобіля з ЕП і реалізації активних функцій захисту її елементів, адаптування керуючих впливів при відхиленнях структурних параметрів і резервування функціональних блоків під час транспортного процесу.

Метою дослідження в даній роботі є побудування і апробація імітаційної моделі системи ЕП автомобіля для ідентифікації її несправностей в транспортних режимах методом спектрального аналізу електричних процесів по колах живлення тягового електродвигуна.

1.2. Передумови досліджень

В системах автомобіля з ЕП, на даний час, передбачені датчики інтегральних параметрів (температури, середніх або діючих значень електричних сигналів), які характеризують режимний стан її силових елементів з метою оптимального перерозподілу потужності між агрегатами силової установки. При цьому, отримана інформація не дозволяє ідентифікувати технічний стан елементів ЕП та локалізувати несправність. Для вирішення цієї задачі в транспорт-

ному режимі необхідно мати систему моніторингу діагностичних параметрів на підставі аналізу яких можна локалізувати несправність, забезпечувати безаварійний режим, упереджати аварійний стан системи ЕП та прогнозувати її залишковий ресурс [2].

Силові кола ЕП автомобіля містять реактивні компоненти та в них відбуваються комутаційні процеси. В наслідок цього, в колах живлення виникають перехідні процеси за характером зміни яких можна визначити технічний стан силової установки. Означені компоненти (конденсатори, АКБ, обмотки електричних машин та індуктивних реакторів) в схемі ЕП з одного боку спричиняють уповільнення перехідних процесів (інерційні ланки), з іншого – підвищують динаміку зміни електричних сигналів (диференційні ланки), залежно від режимів електричного кола, характеру електричного навантаження та схемного підключення.

Періодичність перехідних процесів в колах живлення ЕП створює передумови для гармонійного аналізу функцій зміни напруги і струмів з метою локалізації пошкодженого елемента або монтажу силових електронних пристроїв та електричних машин .

1.3. Аналітичний огляд

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 [6].

Методика (технологія) діагностування, в більшості випадків, визначається метою перевірки (регламентна, на замовлення, 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).

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

В сучасних системах керування агрегатами автомобіля використовуються системи екстреної 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 з бібліотеки даних [7]. Система самодіагностики здатна контролювати технічний стан елементів системи керування (периферійних пристроїв), які безпосередньо підключені до електронного блоку 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, електродвигунів, пневмодвигунів, вузлів та агрегатів трансмісії) під час технічного обслуговування, використовують методи, в яких інформація про стан об'єкту діагностики отримується на підставі гармонійного аналізу [8, 9]. Завдяки високому рівню сучасної вимірювальної техніки, означені методи можуть використовуватися і для поточного контролю за станом силових агрегатів автомобіля в транспортному режимі.

1.4. Структура дослідження

Структура досліджень передбачає вирішення комплексу *задач*, що пов'язані з побудуванням системи моніторингу та синтезом діагностичної системи ЕП автомобіля (рис. 1).

На першому етапі досліджень треба вирішити наступні завдання:

- розглянути структуру системи ЕП автомобіля і особливості її функціонування з метою побудування імітаційної моделі системи ЕП в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink;

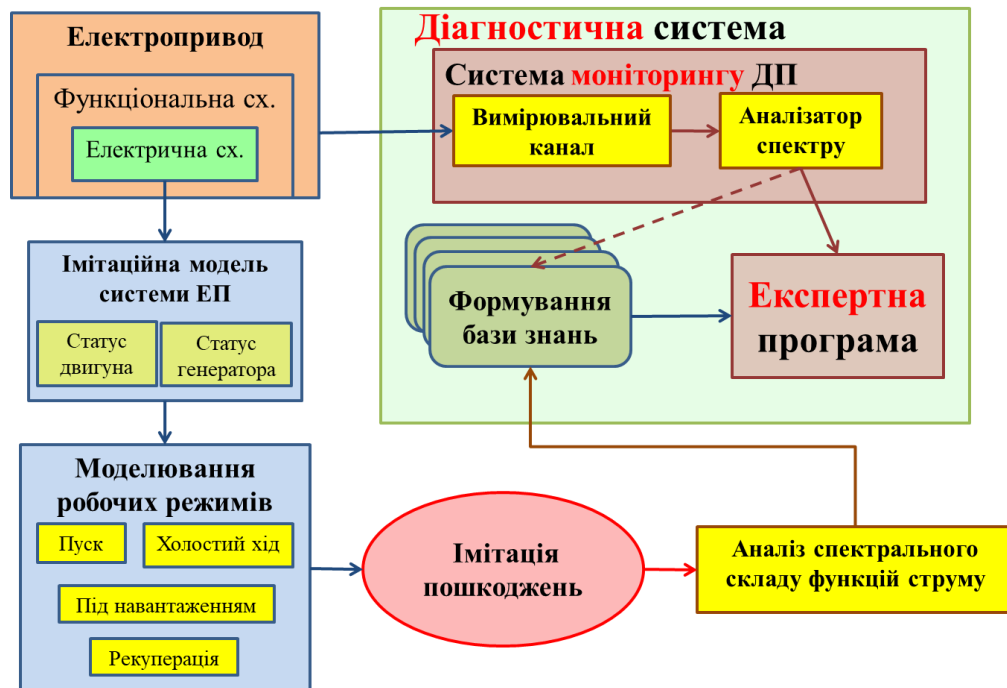


Рис. 1. Структура дослідження

- провести якісний аналіз електричних процесів в колах живлення системи ЕП силової установки автомобіля з метою вибору параметрів у якості діагностичних;
- обрати формати та режими спектрального аналізу процесів в контрольних точках схеми;
- провести віртуальні дослідження електричних процесів у колах справної та несправної системи при структурних пошкодженнях і параметричних відхиленнях з метою ідентифікації технічного стану системи ЕП в експлуатаційних режимах.

На другому етапі досліджень передбачається: запропонувати спосіб реалізації вимірювального каналу системи моніторингу; сформувати базу знань експертної системи на підставі спектрограм електричних процесів у силових колах ЕП автомобіля для ідентифікації несправностей; проаналізувати промислові зразки аналізаторів спектру та запропонувати проектне рішення; синтезувати апаратну структуру інтегрованої системи діагностичного моніторингу.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ МОНІТОРИНГУ

2.1 Структура електроприводу автомобіля

У загальному випадку, склад тягового ЕП автомобіля можна надати компонентними варіантами його основних функціональних елементів (рис. 2).

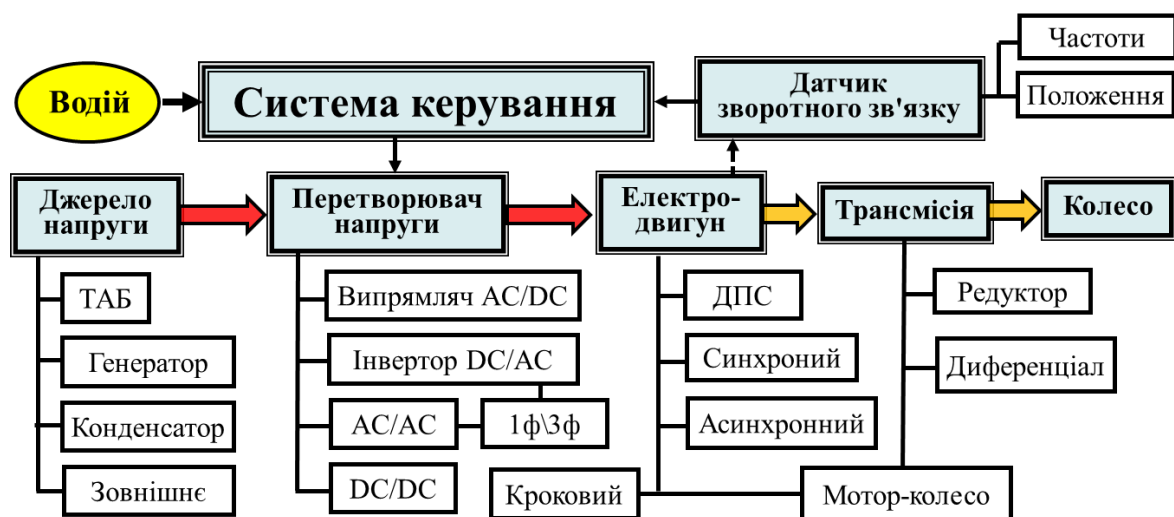


Рис. 2. Склад електроприводу автомобіля

Первинним джерелом електричної енергії на електромобілях є тягова акумуляторна батарея (ТАБ). Конденсатор великої ємності зазвичай використовується як буферний накопичувач енергії в гібридних установках або рекупера- тивних системах. Використання електричної тяги стало пріоритетним напрям- ком розвитку якісної структури АТЗ завдяки ряду переваг електродвигунів (ЕД) перед ДВЗ в транспортних режимах [1]:

В електромобілях, у якості тягових можуть використовуватися різні типи електродвигунів. Тягові ЕД розрізняють за рядом ознак: родом струму і числом фаз; способом передачі енергії на ротор; принципом побудови; способом подачі напруги живлення; особливостями компонування ротора і конструкції двигуна.

Для узгодження параметрів напруги джерел (ТАБ, генератора) і спожива- чів (електродвигунів) електричної енергії використовуються різні електронні пристрої, поєднані в конструкції блоків перетворювачів напруги [10] (рис. 3).

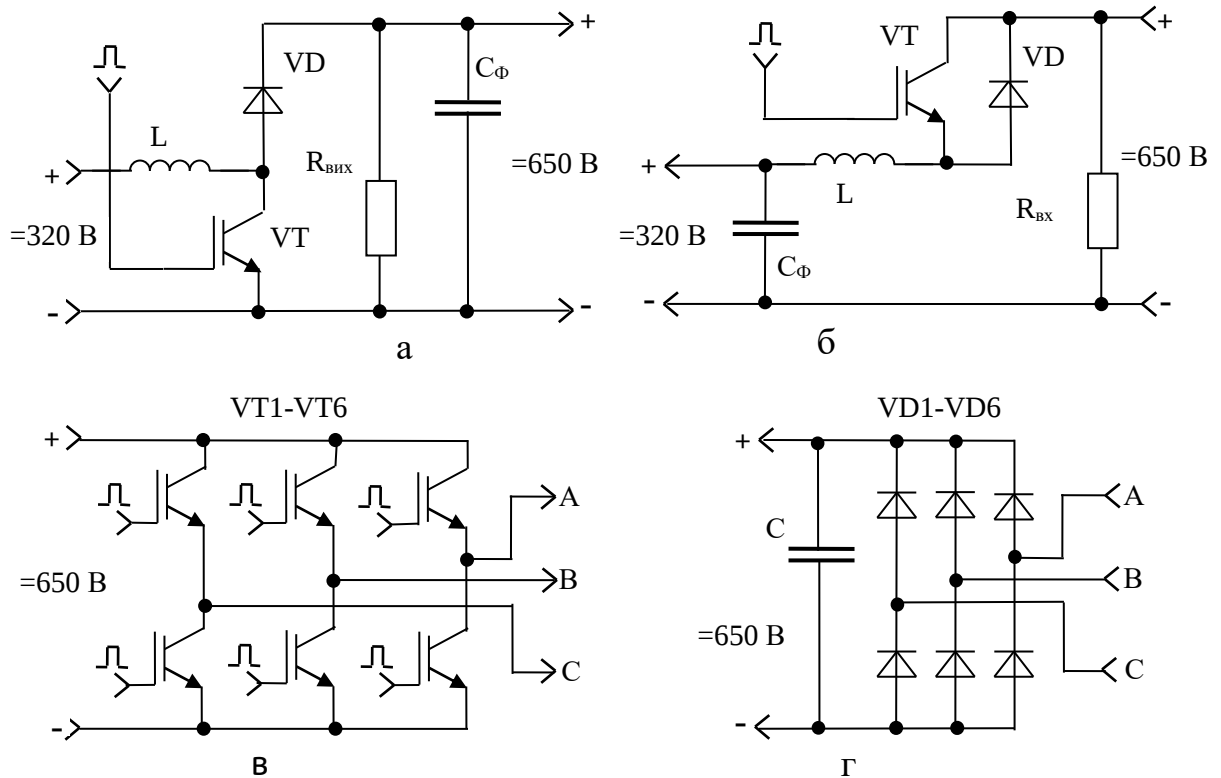


Рис. 3. Схеми електричні принципові перетворювачів напруги:

- а – підвищення постійної напруги; б – зниження постійної напруги;
в – постійної напруги в трьохфазну; г – трьохфазної напруги в постійну

Підвищення постійної напруги (рис. 3, а) реалізується за рахунок комутації струму в реакторі L . Імпульси напруги, індукованої на виході ключа VT , через діод VD надходять на конденсатор C_{Φ} , який заряджається до рівня амплітудних значень. Резистор $R_{вих}$ забезпечує розрядження C_{Φ} при зниженні напруги, що регулюється в процесі керування. Зниження постійної напруги (рис. 3, б) досягають за рахунок підвищення реактивного опору в індуктивному елементі L , шляхом підвищення частоти комутації струму. Резистор $R_{вх}$ узгоджує опір перетворювача з потужністю джерела входної напруги.

Для перетворення постійної напруги в систему трьохфазної напруги живлення електричної машини, використовується шести-плечовий міст ключів під назвою інвертор (рис. 2, в). Почергове вмикання ключів за визначеним алгоритмом дозволяє отримати певну послідовність імпульсів напруги в кожній фазі.

Зворотне перетворення напруги (трёхфазної в постійну) реалізують на трёхфазному випрямлячі побудованому за схемою Лаврентьєва (рис. 3, г).

Для перетворювання електричної енергії в обертовий момент і навпаки використовуються електричні машини подвійного призначення. Найбільш ефективними перетворювачами в цьому плані є вентильні трёхфазні електричні машини, які характеризуються високими питомими показниками.

2.2 Методи та способи керування електродвигуном

Метод керування вентильними машинами змінного струму визначає алгоритм функціонування частотного перетворювача системи керування [11]. *Скалярний метод керування* простий в реалізації, але має недоліки на динамічних режимах функціонування приводу. *Векторне керування* на відміну від скалярного, дозволяє незалежно і без інерції керувати швидкістю обертання і моментом на валу двигуна. При цьому, для створення обертаючого магнітного поля в системі керування використовується перетворювач координат.

Для реалізації алгоритму керування ВЕД, потрібна інформація про поточне положення і частоту обертання ротора машини (зворотний зв'язок). Цю інформацію отримують на підставі сигналів датчиків кутового положення ротора або миттєвого значення струмів в фазах.

Як предмет дослідження, розглянемо структурну схему системи вентильного синхронного двигуна, яка складається з синхронно машини СД зі збудженням від постійних магнітів і координатним датчиком положення ротора ДПР, контролера електричної машини КЕМ і силових кіл. Сигнал ДПР одночасно несе інформацію і про частоту обертання ротора ДЧО (рис. 4).

Швидкісний режим ВЕД задається сигналом датчика положення акселератора ДПА (електронна псевдопедаль). На момент початку руху або при стаціонарному швидкісному режимі, перетворювач координат обчислює оптимальні фазо-часові параметри фазних струмів на підставі інформації, отриманої від датчика ДПР.

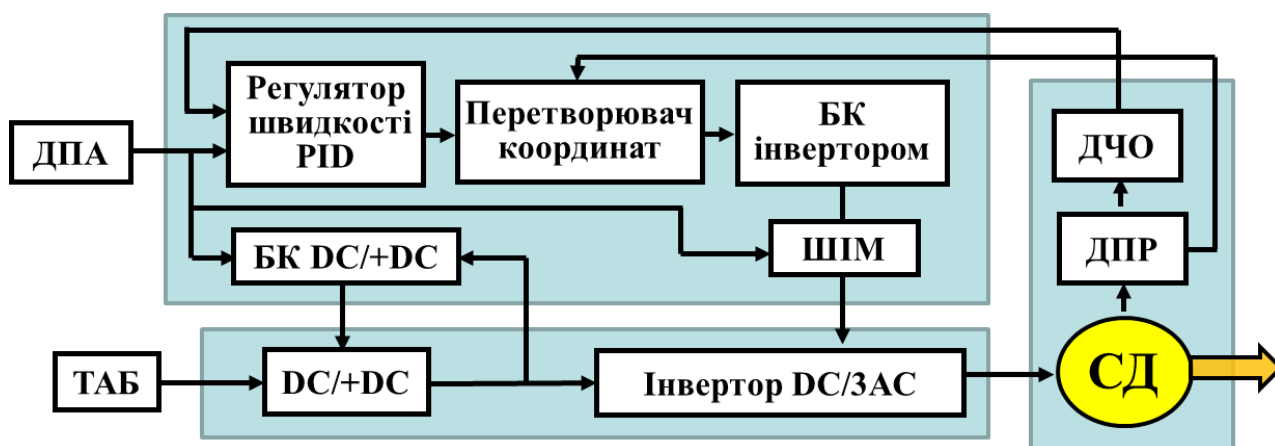


Рис. 4. Структурна схема системи вентильної синхронної машини

Блок керування інвертором, згідно з отриманими даними, формує послідовність адресних імпульсів для керування силовими ключами інвертора. Інвертор підключає живлення фазних обмоток синхронного двигуна СД до джерела напруги. Для узгодження номінальної напруги ТАБ з робочою напругою двигуна використовується підвищуючий перетворювач постійної напруги DC/+DC. Для стабілізації обраного швидкісного режиму застосується ПІД-регулятор зі зворотним зв'язком по сигналу датчика ДЧО.

У динамічних режимах, зміна частоти обертання під заданим навантаженням двигуна, можна досягти двома способами – зміною напруги на виході DC/+DC або зміною середнього значення струму за допомогою ШІМ-регулювання. У першому випадку, регулюється частота імпульсів керування ключем перетворювача DC/+DC, в другому, – шпаруватість імпульсів насічки сигналів керування ключами інвертора.

Оборотність синхронної машини використовується для зарядки ТАБ за рахунок рекуперативної енергії гальмування. Режими ЕП у статусах мотора «М» або генератора «G» активізуються натисканням педалей відповідно акселератора або гальма (рис. 5).

На схемі товстими суцільними стрілками позначено напрямок передачі потужності в режимі «М», товстими пунктирними – в режимі «G».

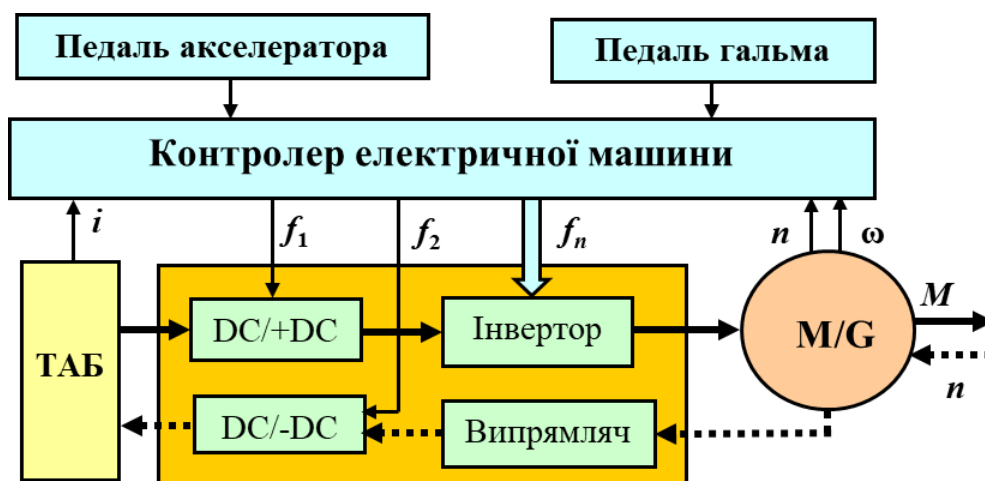


Рис. 5. Функціональна схема електроприводу

Тонкі стрілки символізують керуючі сигнали. Вихідні напруги перетворювачів регулюються відповідними сигналами f_1 і f_2 . Потужність на виході інвертора та відповідно і електродвигуна керується сигналом f_3 та сигналами комутації f_n , які формуються на підставі сигналу кутового положення ротора машини ω .

У режимі мотора, потужність передається описаним способом (суцільні стрілки). У режимі генератора (пунктирні стрілки), використовується випрямляч і понижуючий перетворювач DC/-DC. У КЕМ надходить інформація про частоту обертання ротора генератора n і про рівень зарядного струму i , батареї ТАБ. На підставі цих сигналів, КЕМ регулює коефіцієнт передачі напруги DC/-DC зміною частоти імпульсів керування f_2 , обмежуючи струм заряду на допустимому рівні. У реальних системах контролюється температура силових елементів для визначення їхнього електричного навантаження і ступеню зарядженості ТАБ.

2.3 Кола живлення електричної машини

Синтез окремих перетворювачів напруги різного призначення дозволяє поєднати їх в блок силових кіл (рис. 6).

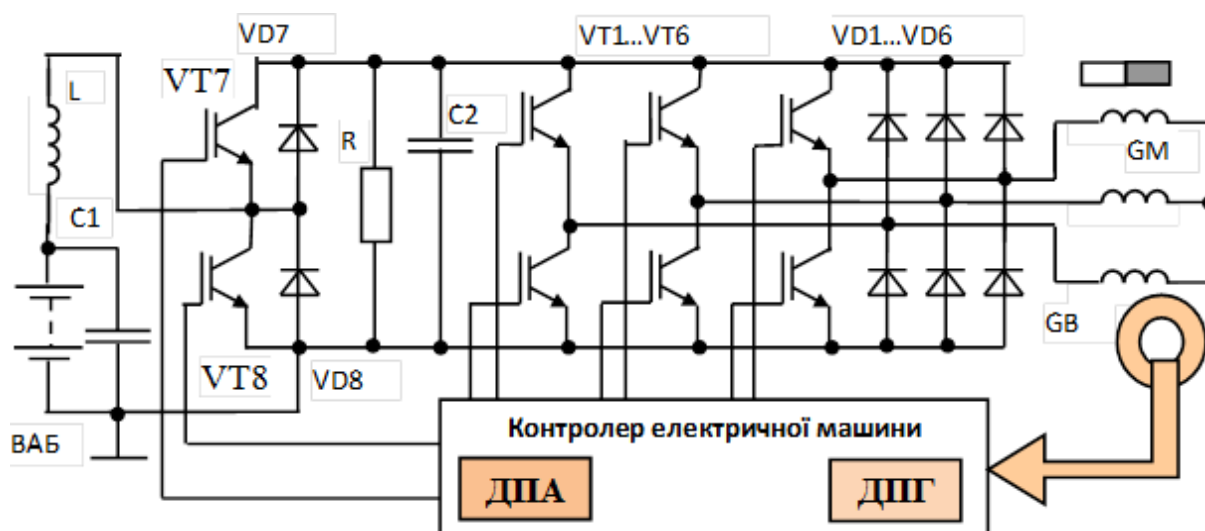


Рис. 6. Схема електрична силових кіл оборотного приводу

У статусі «М», КЕМ сприймає сигнал положення педалі акселератора і на підставі інформації про кутове положення валу машини (GB датчик), формує імпульси керування ключами інвертора (VT1...VT6) та ключем VT8 перетворювача DC/+DC. Період робочого циклу електричних процесів в схемі перетворювача визначається часом перемикання струму в реакторі L. Діод VD8 захищає VT2 від інверсної перенапруги що виникає внаслідок комутації струму, а діоди VD1...VD6 забезпечують захист транзисторів інвертора від перенапруги, що виникає внаслідок комутації струму в обмотках електродвигуна.

У статусі «G», міст VD1...VD6 виконує функції випрямляча трьохфазної напруги. Оптимальний режим зарядки ТАБ підтримується ключем VT7. Ключ керується сигналом з КЕМ на який надходить інформація про швидкісний режим генератора (GB датчик), рівень зарядки ТАБ, положення педалі гальм та інтенсивності її натиснення.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В MATLAB

3.1 Синтез моделі системи з ідеальним джерелом живлення

Для моделювання процесів в колах системи вентильного двигуна побудовано імітаційну модель її схеми в пакеті прикладних програм «Matlab/Simulink» [2, 12]. Модель містить трифазну синхронну машину зі збудженням від постійних магнітів «VentilDvig», трифазний інвертор «IGBT Inverter», блок керування інвертором «PWM Generator» і перетворювач координат «dq2abc» (рис. 7).

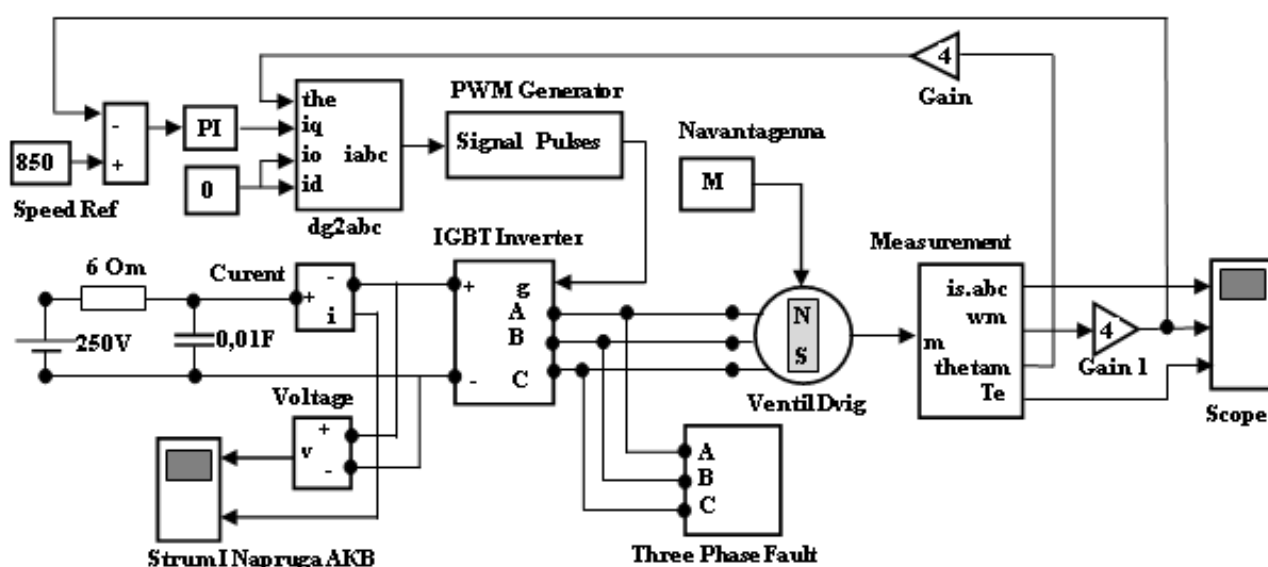


Рис. 7. Спрощена схема моделі системи вентильного двигуна

Швидкість обертання приводу задається блоком «Speed Ref», вимірювання змінних стану машини здійснюється універсальним блоком «Measurement», спостереження за миттєвими значеннями електричних параметрів кола живлення виконується за допомогою осцилоскопу «Strum i Napruha AKB».

Для першого експерименту обрано вентильну машину з синусоїдальним розподілом поля в робочому проміжку з переліку варіантів каталогу Simulink-модель №5 (номінальний крутний момент $M_H=8$ Нм, номінальна швидкість обертання $n_H=2000$ хв⁻¹, максимальна напруга живлення $U_{\max}=300$ В). Шостиплечовий інвертор (модель мосту №3) побудований на IGBT ключах з діодами, що їх шунтують. В моделі не враховується вплив розподілених параметрів мон-

тажу пристрою, розглядаються режими тільки в статусі мотора, розглядається структура без перетворювача постійної напруги DC/+DC. Навантаження двигуна задається постійним $M_e=10$ Нм, використовується ідеалізована модель ТАБ з номінальною напругою $U_B=250$ В і внутрішнім активним опором $r_0=6$ Ом.

Результати попередніх досліджень показали, що найбільш інформативними параметрами в силовій частині ЕП є миттєві значення струму i та напруги u в колі живлення. Крім того, технологія вимірювання цих параметрів не потребує суттєвих утручань в апаратну частину ЕП.

3.2 Апробація ідеалізованої моделі системи в експлуатаційних режимах

При активізації режиму розгону електродвигуна без механічного навантаження на валу виникають перехідні процеси в колі живлення (рис. 8).

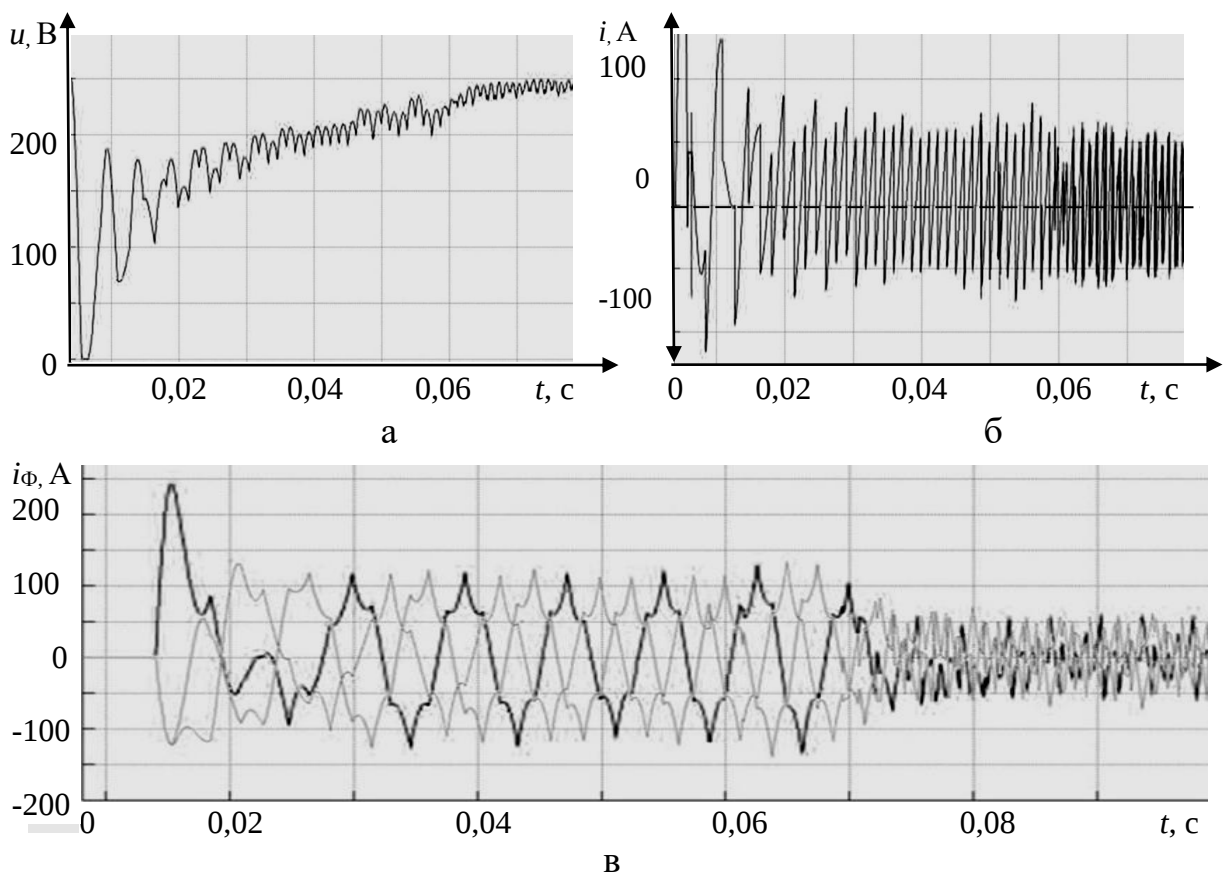


Рис. 8. Осцилограми вимірювань під час розгону двигуна:

а – напруги на затисках ВАБ; б – струму в колі живлення; в – фазного струму електродвигуна

На момент пуску, струм споживання i досягає максимальних значень, а напруга живлення u практично спадає до нуля. Далі по мірі розгону, діючи значення напруги та струму стабілізуються до рівня значень режиму холостого ходу. Слід відзначити, що на часових функціях струму i_{Φ} , у якірних обмотках електродвигуна (рис. 8, в) спостерігаються додаткові верхні гармоніки меншої амплітуди, що викликані комутаційними процесами в інверторі.

Якісний аналіз процесів на робочих режимах ЕП показує наступне [12]. На функціях напруги і струму спостерігаються нижні гармонійні складові більшої амплітуди, які характеризують інерційні якості приводу на сталому режимі. При подачі навантаження на вал двигуна середнє значення напруги живлення знижується за рахунок падіння на внутрішньому опорі ТАБ та спостерігаються помітні пульсації з частотою переключення транзисторів інвертора з підвищенням амплітудних значень струму споживання. При цьому, спостерігаються і нижні гармонійні складові меншої амплітуди.

3.3 Синтез і апробація моделі перетворювача напруги постійного струму

На наступному кроці побудовано модель перетворювача DC/+DC з індуктивним реактором (рис. 9).

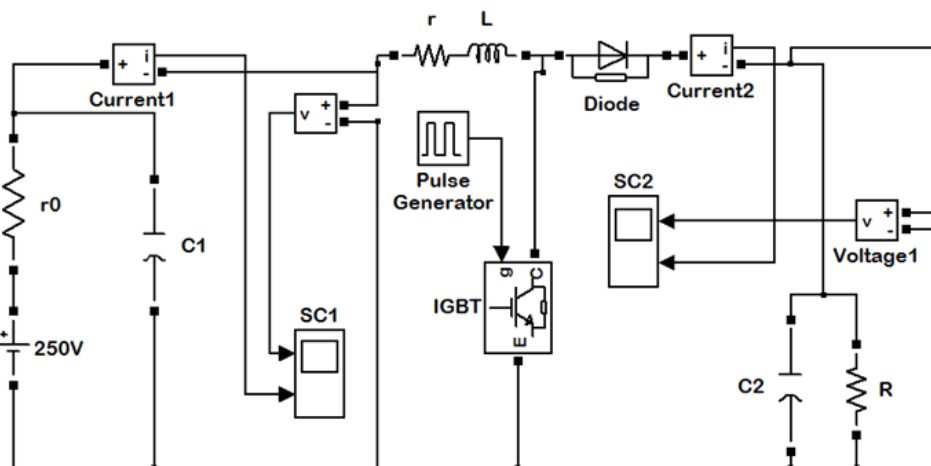


Рис. 9. Схема моделі перетворювача підвищеної напруги

Згідно наведеної схеми, струм через реактор (r , L) комутується транзисторним ключем IGBT. Таким чином, період робочого циклу електричних процесів

в схемі перетворювача визначається часом перемикання транзисторного ключа. Під час замкнутого стану ключа, до реактора підведена вхідна напруга ТАБ $U_1=250$ В. На виході схеми підтримується постійна напруга $U_2=500$ В. Дані пасивних елементів схеми відповідають значенням параметрів схеми блоку перетворювачів напруги автомобіля Lexus RX400h: $L=0,5$ мГн; $r_0=r=0,01$ Ом; $C_1=C_2=0,003$ Ф; $R=20$ Ом. Для спостереження миттєвих значень струму та напруги на вході і виході перетворювача застосовані вимірювальні адаптери Current і Voltage та осцилографи SC1 і SC2. Для активізації транзисторного ключа IGBT використовується генератор прямокутних імпульсів Pulse Generator.

Схема моделі перетворювача досліджується на стаціонарному режимі. При цьому, частота генератора становить $f_{\Pi}=20$ кГц, амплітуда імпульсів 3 В, шпаруватість 50 %. Після активізації моделі отримані осцилограми струмів та напруги на вході та виході перетворювача (рис. 10).

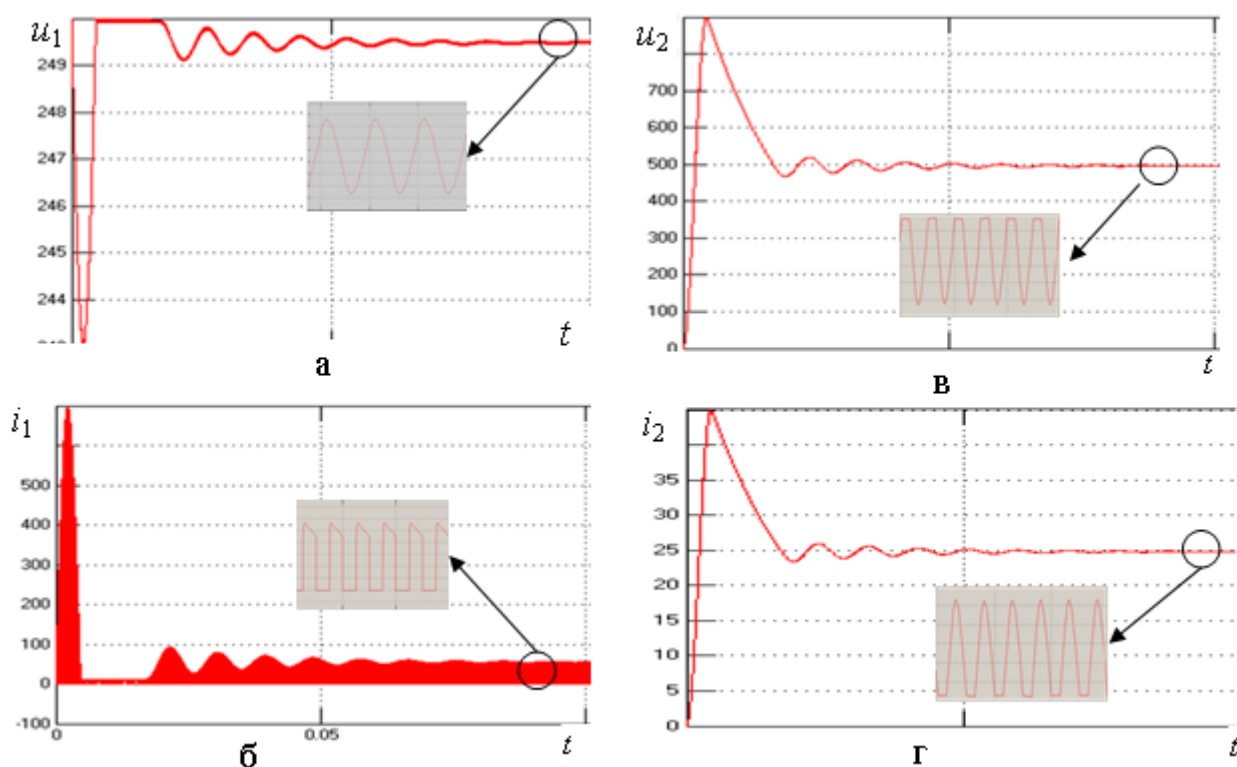


Рис. 10. Осцилограми електричних процесів на вході і виході перетворювача напруги: а – напруга на затисках ТАБ; б – струм в колі ТАБ; в – підвищена напруга перетворювача; г – струм на виході перетворювача

За результатами аналізу наведених осцилограм можна зробити висновки про адекватну реакцію моделі. На час вмикання живлення схеми (режим пуску) спостерігається помітний кидок струму $I_1=700$ А викликаний зарядом ємності конденсатора С1. Максимальні значення цього струму обмежуються тільки внутрішнім опором джерела живлення r_0 , а тривалість кидка – величиною ємності конденсатора С1. При цьому напруга ТАБ U_1 підсаджується на величину падіння напруги на внутрішньому опорі $U_{1A}=r_0I_1=700\cdot0,01=7$ В (спостерігається режим короткого замикання ТАБ). Далі, протягом постійної часу τ_{Π} відбуваються перехідні процеси після чого настає сталий режим. Тривалість перехідних процесів τ_{Π} визначається значеннями параметрів пасивних елементів схеми (r, R, L, C). В сталому режимі також відбувається періодичний процес обумовлений перемикаваннями транзисторного ключа з частотою генератора Pulse Generator 20 кГц (локально розгорнуто на кожній осцилограмі). Величина пульсацій напруги та струму при цьому значно менше.

На виході перетворювача відбуваються аналогічні процеси. В період режиму пуску спостерігається кидок напруги U_2 обумовлений кидком струму I_1 та відповідно до закону Ома пропорційно цій напрузі створюється імпульс струму I_2 через лінійне навантаження перетворювача $I_2=U_2/R=900/20=45$ А. Далі після перехідного процесу настає сталий режим під час якого підтримується середнє значення підвищеної напруги U_2 . Величина пульсацій ΔU_2 при цьому, визначається значенням постійної часу $\tau=C_2R$ та для даного експерименту не перевищує одного відсотка.

3.4 Побудування і апробація моделі системи з перетворювачем напруги

В більш досконалій моделі системи ЕП використовується перетворювач DC/+DC та Simulink-модель ТАБ, що враховує її енергетичну і умовну Фарадеївську ємності [13, 14] (рис. 11).

У якості первинного джерела напруги обрано модель ТАБ (Battery) NiMH-типу з номінальною напругою $U_B=220$ В та номінальною ємністю $C_B=5$ А/год.

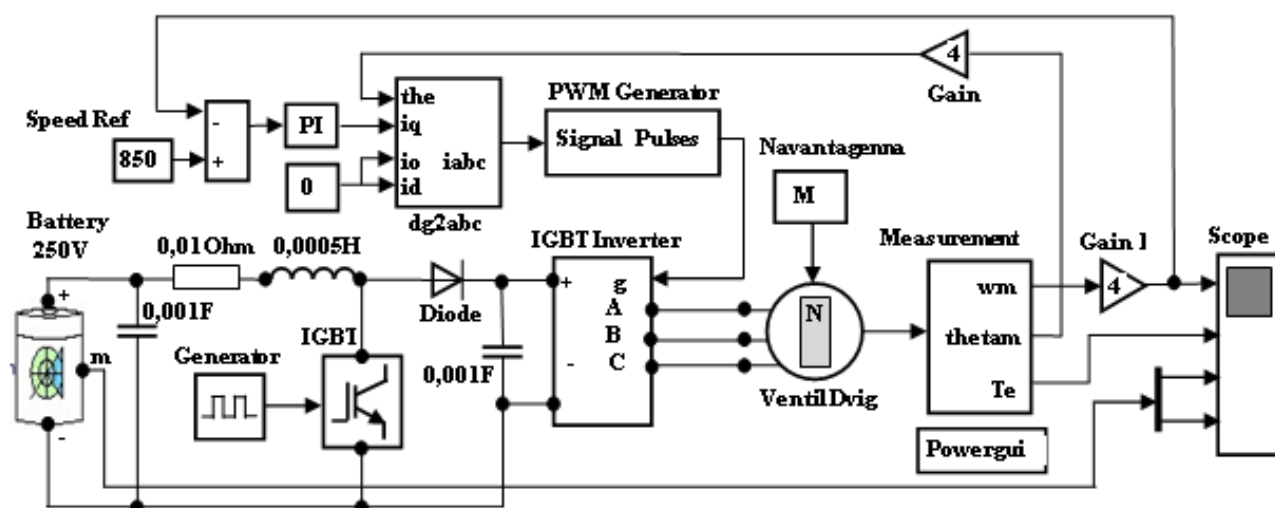


Рис. 11. Уточнена схема моделі системи вентильного двигуна

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. Підтримка заданої швидкості обертання під навантаженням (блок 850) здійснюється через регулятор Speed Ref.

В схемі використана Simulink-модель вентильного електродвигуна №12, який розвиває номінальний обертовий момент $M_H=35$ Нм при номінальній швидкості обертання $n_H=3000$ хв⁻¹. Навантаження електродвигуна становить 37 Нм, підтримується швидкість обертання валу $n=850$ хв⁻¹. Подача навантаження (блок Navantagenna) на електродвигун відбувається через 0,3 с. після його вмикання. Результати апробації активованої моделі, показані на рис. 12.

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, мають максимальні значення.

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.

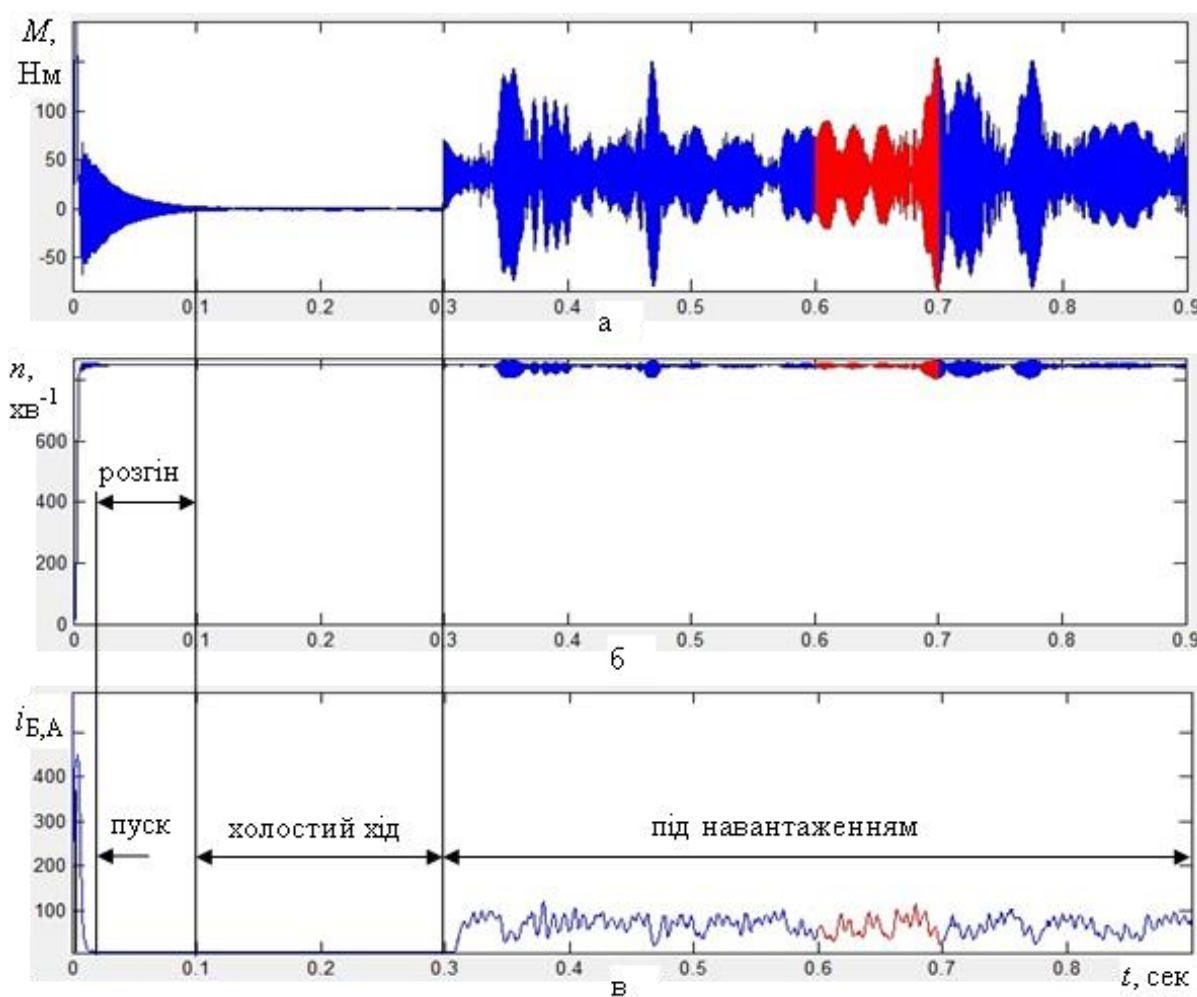


Рис. 12. Функції вихідних характеристик електроприводу:

а – моменту на валу електродвигуна; б – швидкості обертання ротора;

в – струму у колі ТАБ

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 $n=850$ хв⁻¹, а струм розряду батареї i_B має мінімальні значення.

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 та перетворювача напруги [13, 14].

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

4.1 Спектральний аналіз електричних процесів справної системи

Очевидно, що при виникненні несправностей в системі, характер перехідних процесів буде змінюватись. До несправних станів системи які не приводять до зупинки електроприводу але погіршують його характеристики можна віднести: втрату ємності ТАБ і конденсатору фільтру; вихід ключів інвертора з режиму насичення; пробій окремих ключів; зростання перехідних опорів на монтажних з'єднаннях; виткові замикання в обмотках електродвигуна; пробой силових кіл живлення на корпус та інші.

Результати апробації моделі (рис. 11) показали, що найбільш інформативним параметром в силовій частині ЕП є миттєві значення струму в колі первинного джерела живлення (ТАБ) i_b . Крім того, технологія вимірювання струму безконтактним способом (використання лінійних датчиків Холла) не потребує суттєвого втручання в апаратну частину ЕП.

Для визначених режимів ЕП (ділянок функції i_b згідно рис. 12) 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 ЕП, 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 ЕП слід обирати певні формати спектрограм. Для цього, в меню інструментів Powergui обирається режим FFT Analysis та налаштовуються опції аналізатору спектра (частота спостереження Max Frequency та базова частота відносного відліку амплітуди гармонік (Fundamental Frequency FF). Таким чином, можна послідовно або одночасно спостерігати сигнал справної системи у різних наданнях [13, 14] (рис. 13).

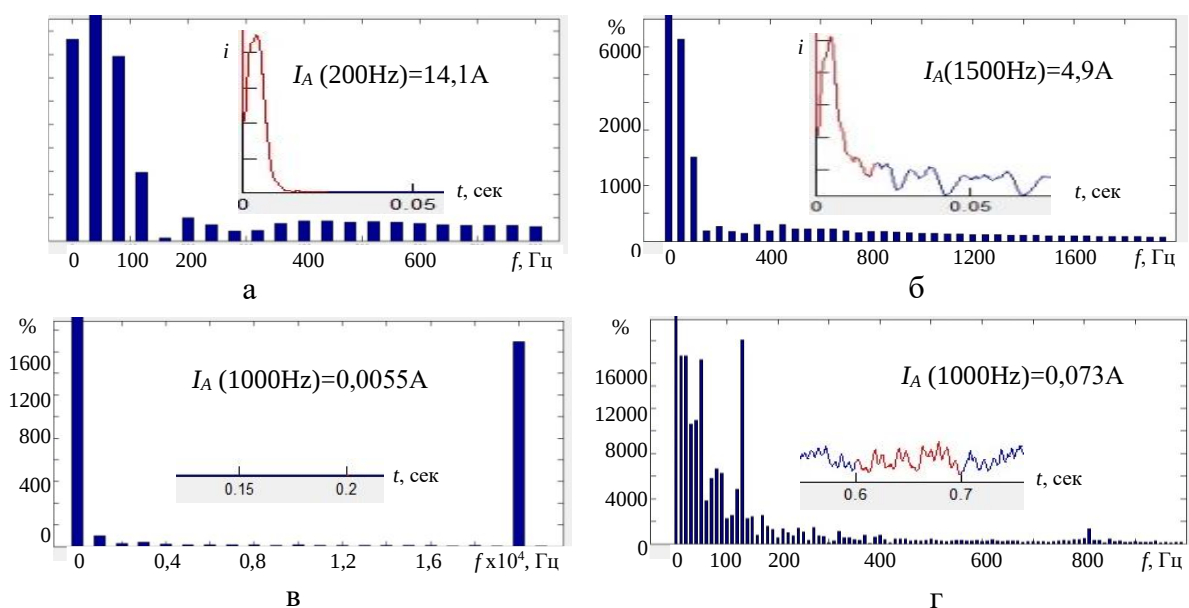


Рис. 13. Спектральні характеристики функцій струму у колі ТАБ на режимах вентильного електродвигуна: а – пуску без навантаження; б – пуску під навантаженням; в – холостого ходу; г – стаціонарного навантаження

На рисунках позначено амплітуди базових гармонік $I_A(FF)$ функцій струму на відповідних режимах (формат спостереження). 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) гармонійками для режимів пуску (рис. 13, 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. Постійна складова, при цьому, становить $I_{П,0} = 120$ А.

На холостому ході (рис. 13 в) домінуючою є гармоніка 20 кГц, амплітудою $I_A(f_{20000}) = 0,1$ А, спричинена комутацією ключа перетворювача напруги. Постійна складова, в такому разі становить $I_{Х,0} = 0,137$ А.

Під час функціонування приводу під навантаженням (рис. 13 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

ся 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.

4.2 Моделювання несправних станів системи

Щоб сформувати базу даних експертної системи для ідентифікації технічного стану ЕП автомобіля, в отриманій моделі системи (рис. 11) слід імітувати пошкодження її елементів в експлуатаційних режимах та спостерігати за спектральним складом функції струму у 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.

Функції швидкості обертання валу електродвигуна та струму розряду ТАБ для справної системи при пуску, холостому ході і роботи двигуна під навантаженням показані на (рис. 12, б і в). Після активізації моделі і послідовній імітації пошкоджень, отримані осцилограми означених функцій для несправних станів системи [15]. (рис. 14).

Обрив кола конденсатора $C1$ (рис. 14, а) практично не призводить до зміни обертів n і тому симптом несправності не реєструється. Вразі порушення кола транзисторного ключа (рис. 14, б), напруга живлення інвертора дорівнює напрузі ТАБ. При цьому, пуск і холостий хід електродвигуна відбуваються без симптом, а під навантаженням оберти валу спадають до $n=610 \text{ хв.}^{-1}$ на холостому ході та виникає деяка нерівномірність обертання.

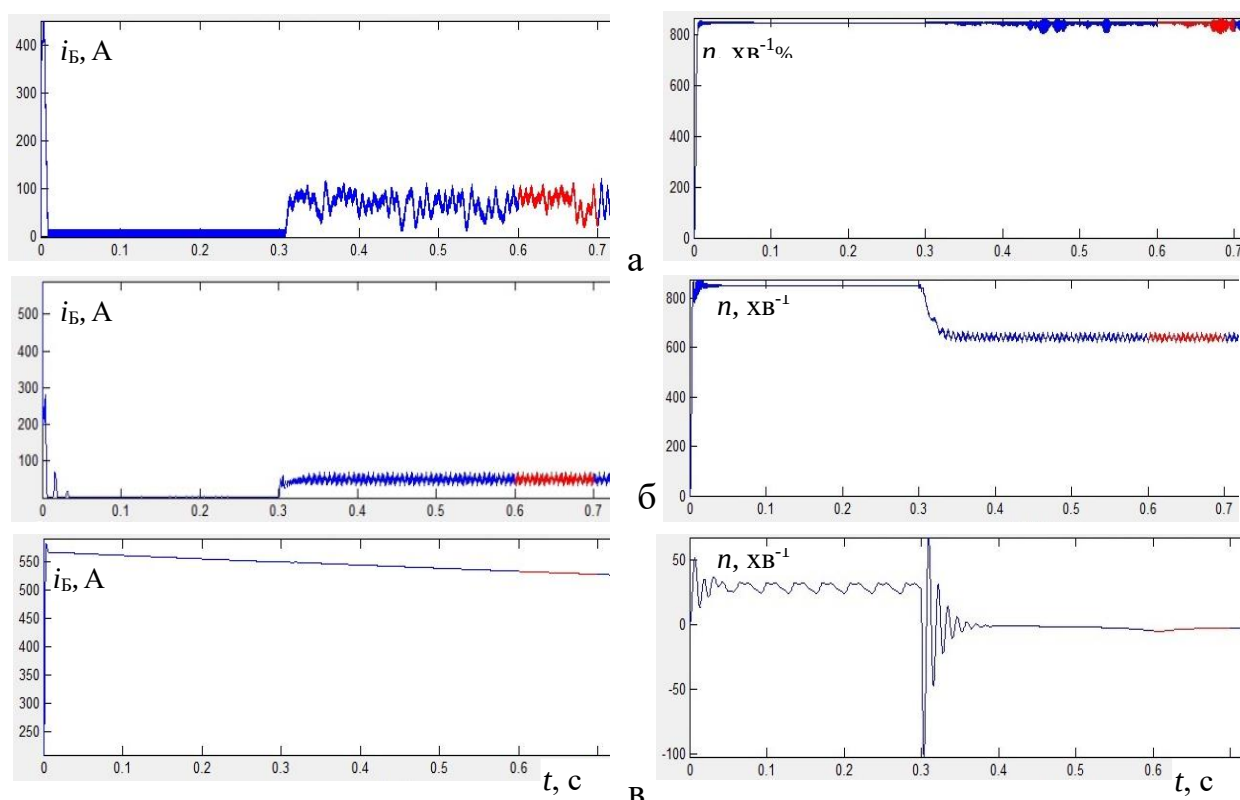


Рис. 14. Часові функції в несправних станах системи:

а – з обірваним конденсатором; б – при непрацюючому перетворювачі напруги; в – з пробитим діодом

Пробій діода (рис. 14, в) викликає шунтування перетворювача напруги, струм ТАБ обмежується тільки резистивним опором кола живлення. Недостатній момент на холостому ході повільно і нерівномірно обертає ротор двигуна з середньою швидкістю $n=30 \text{ xv}^{-1}$. Під навантаженням, в цьому випадку, електродвигун зупиняється.

Слід 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. 14, а) від справного, доречно провести спектральний аналіз функції струму ТАБ, характер зміни якої має навіть якісні відмінності.

4.3 Структурна ідентифікація пошкоджень компонентів системи

Для проведення спектрального 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 кожного з трьох режимів. На рис. 15 показані спектрограми отримані під час пуску електродвигуна [15].

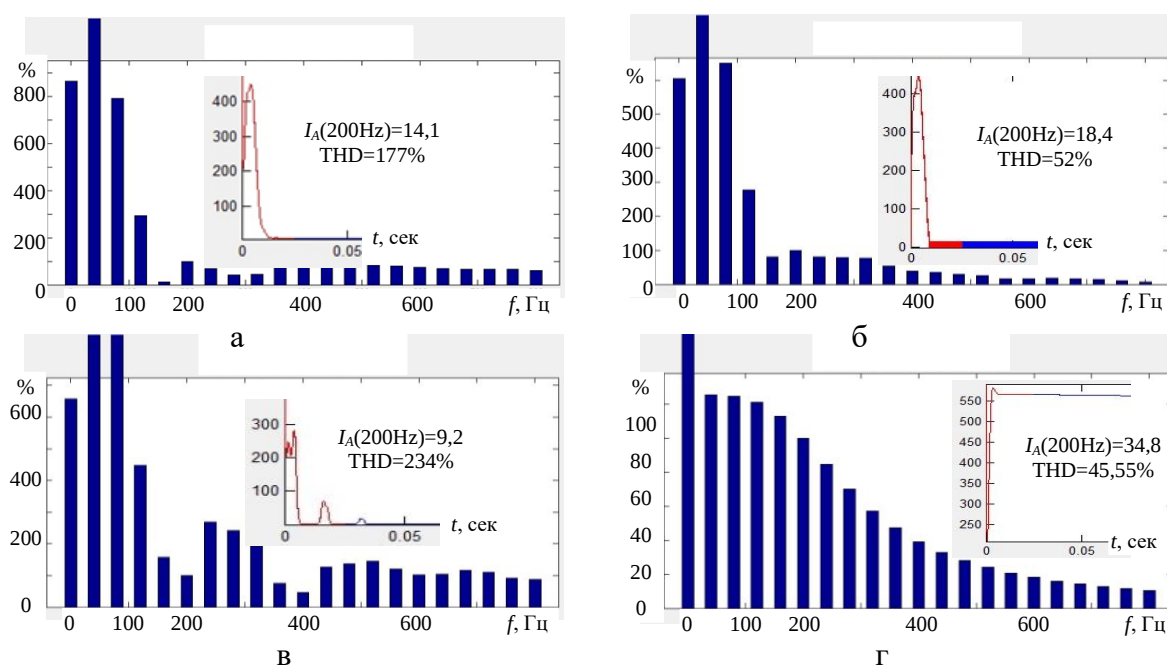


Рис. 15. Спектральний склад часових функцій струму у колі живлення під час пуску електродвигуна в технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором; в – при непрацюючому перетворювачі напруги; г – з пробитим діодом

В полі рисунків позначено амплітуди базових гармонік $I_A(FF)$ і коефіцієнти гармонік THD (Total Harmonic Distortion) функцій струму на відповідних режимах. Абсолютні дискретні значення амплітуди кожної j -тої гармоніки функції струму, визначаються за прийнятою формулою. 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. Відхилення цих параметрів від нормованих значень непрямо свідчить про змінення значень електричних параметрів кола живлення (несправність елементів ТАБ, С1, L). Аналіз спектрограм показує, що функція пускового кидка струму для розглянутих технічних станів різняться за амплітудними показниками [15].

На режимі холостого ходу, стан з обірваним конденсатором відокремлюється від справного стану за рівнями постійної складової та гармоніки $f=20$ кГц (рис. 16, а і б).

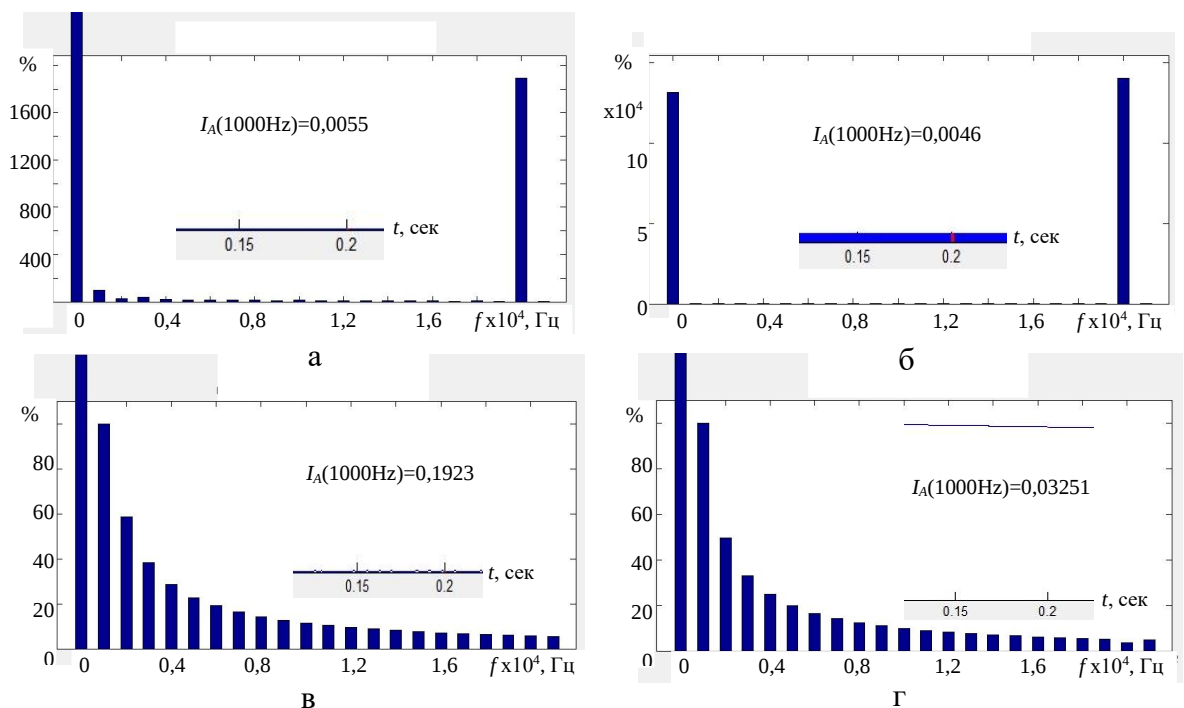


Рис. 16. Спектральний склад часових функцій струму на холостому ході електродвигуна в технічних станах системи: а – справної; б – з обірваним конденсатором; в – при непрацюючому перетворювачі напруги; г – з пробитим діодом

Останні два стани, на перший погляд, якісно не розрізняються, однак кількісно різняться за амплітудними значеннями складових і коефіцієнтом гармонік (рис. 16, 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. 17).

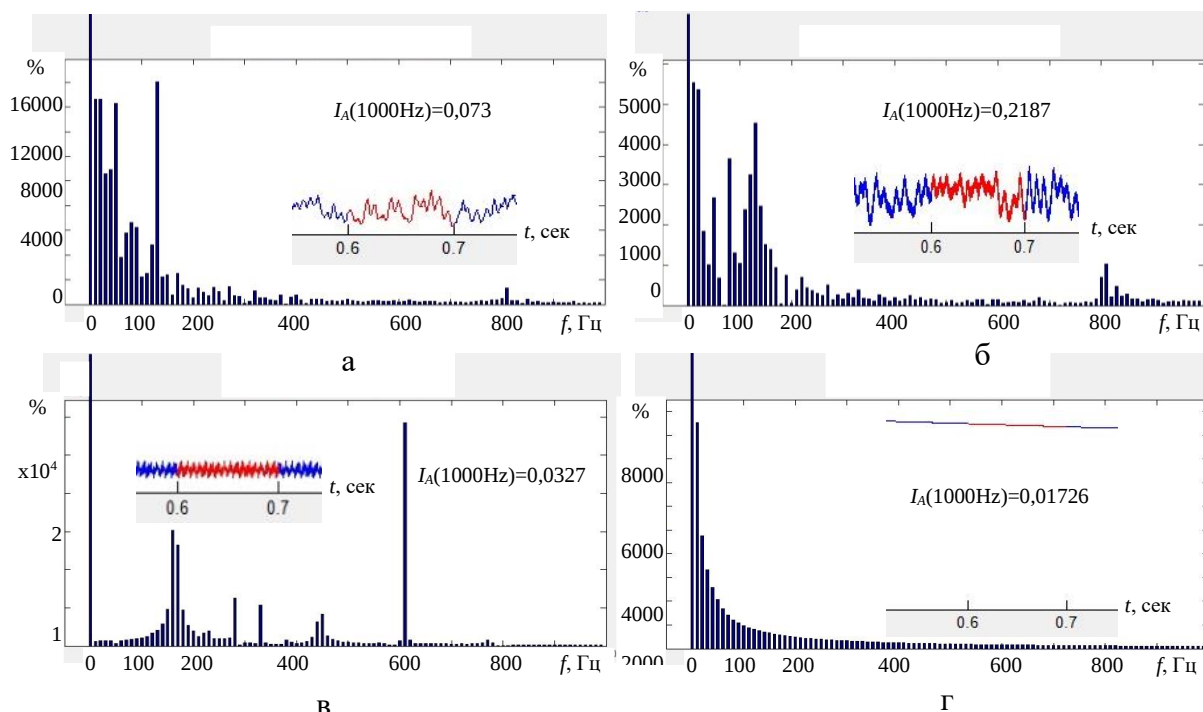


Рис. 17. Спектральний склад часових функцій струму при функціонуванні електродвигуна під навантаженням в технічних станах системи:

а – справної; б – з обірваним конденсатором; в – при непрацюючому перетворювачі напруги; 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

Розглянуто структуру системи ЕП автомобіля як об'єкту діагностики.

Побудована та апробована імітаційна модель системи ЕП автомобіля з синхронним вентильним електродвигуном в пакеті програм Matlab/Simulink.

Проведено якісну оцінку електричних процесів в системі ЕП на експлуатаційних режимах за допомогою віртуального осцилографа. Показано, що періодичні функції струмів і напруги характеризуються гармонійками, які спричинені комутацією ключів інвертора та перетворювачів постійної напруги.

Визначено, що для кількісної оцінки режимних параметрів силової установки, доречно використовувати метод спектрального аналізу функції струму в колі живлення електродвигуна. При цьому, інформативність спектрограм, як характеристика діагностичного параметра, визначається опціями налаштування віртуального аналізатора.

Обрано формати спектрограм проведення аналізу функцій струму методом швидкого перетворення Фур'є (FFT-аналізу) для певних експлуатаційних режимів силової установки. З'ясовано, що склад домінуючих гармонік в спектрограмах залежить від конструктивних показників електродвигуна, схемного рішення інвертора напруги та режимів, які вони забезпечують.

Проведено дослідження діагностичної моделі системи ЕП для окремих структурних пошкоджень в блоці перетворювача постійної напруги, шляхом аналізу спектральних характеристик діагностичного параметра. При цьому, чутливість діагностичного параметру визначається розбіжністю амплітуд та фазових зсувів окремих гармонік спектру для заданого режиму системи ЕП, а інформативність – розбіжністю спектрограм обраного режиму для різних технічних станів (справного та несправних).

Результати віртуальних досліджень підтверджують можливість застосування запропонованого методу моніторингу для побудування інтегрованої діагностичної системи ЕП автомобіля з функціями активної підтримки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скворцов В.А. Тенденции в развитии транспортных средств с использованием электропривода. / В.А. Скворцов, А. Берестов. // Силовая электроника. – №1. – 2004. – С. 85 – 87.
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. Системы мониторинга. / Матеріали сайту – 2019. – Режим доступу: https://studopedia.su/7_1705_sistemi-monitoringa.html
4. Экспертная система. / Матеріали сайту – 2019. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/>
5. Инвертор: что это и как работает. Принцип работы гибридного Lexus (Toyota). / Матеріали сайту – 2019. – Режим доступу: <https://club-lexus.ru/faq/index.php?article=724>
6. Чекалин В.Г. Диагностика и наладка автоматизированных электроприводов. Учебное пособие для ВТУЗов / В. Г. Чекалин. – Душанбе: ТТУ им. М. Осими, 2011. – 211с.
7. Бороденко Ю.М. Діагностика мехатронних систем автомобіля / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.М. Биков. Навч. посібник. Харків: ХНАДУ, 2016. – 320 с.
8. Баркова Н.А. Современное состояние вибро-акустической диагностики машин: [<http://vibrotek.com/russian/articles/sovrstost/index.htm>].
9. Siddiqui K. M., Sahay K., Giri V. K. Health monitoring and fault diagnosis in induction motor-a review. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Т. 3. – №. 1. – С. 6549-6565.
10. Инвертор: что это и как работает. Принцип работы гибридного Lexus (Toyota). / Матеріали сайту – 2019. – Режим доступу: <https://club-lexus.ru/faq/index.php?article=724>

11. Управление вентиляльным электродвигателем. / Матеріали сайту – 2019.
– Режим доступа: <http://electricalschool.info/elprivod/1910-upravlenie-ventilnym-jelektrodvigatelem.html>.

12. Arhun S., Borodenko Y., Hnatov A., Popova A, Hnatova H, Kunicina N, Ziravecka A, Zabasta A, Ribickis L Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2020. Вип. 57, № 4. С. 3–11. (Scopus, Q3, WS)

12. 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.

13. 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.

14. Borodenko Y., Ribickis L., Zabasta A., Arhun Shch., Kunicina N., Hnatova H., Hnatov A., Patlins A. Konstantins Kunicins. Using the Method of the Spectral Analysis in Diagnostics of Electrical Process of Propulsion Systems Power Supply in Electric Car. Przegląd Elektrotechniczny. - 2020. - R96. – 10. – P. 47-50. DOI: 10.15199/48.2020.10.08 (Scopus, Q3).

15. Бороденко Ю.М. Ідентифікація несправностей електроприводу автомобіля з вентиляним двигуном. Вестник ХНАДУ. Харьков. 2016. Вып. № 72. С. 13 – 18.