

УДК 621.311

Т. К. Бараненко, к. т. н., доц.;

В. Є. Саравас, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Розроблено імітаційну модель вентильного двигуна, який отримує напругу заданої частоти від перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму. В середовищі Matlab проведено аналіз електромагнітної сумісності частотно-регульованого електроприводу з мережею живлення. Наведено результати моделювання системи, криві вхідних струму і напруги, їх гармонічні спектри з різними параметрами системи.

Здобутки в галузі силової електроніки та мікропроцесорної техніки створили сприятливі умови для розробки і виробництва такого регульованого електроприводу як вентильний двигун (ВД).

Провідні зарубіжні електромашинобудівні компанії, такі як «Siemens», «General electric», «Fanuc», та ін., у своїх виробничих програмах перше місце віддають ВД з постійними магнітами, рідкоземельних матеріалів оскільки даний тип двигунів залишається найперспективнішим за всі типи електродвигунів, які застосовують в сучасних регульованих електроприводах малої і середньої потужності. Це пояснюється низкою конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг вентильного двигуна у порівнянні з існуючими типами електричних машин. Крім того, економічний ефект від впровадження ВД зумовлює до 40 % економії енергоресурсів, до 30 % збільшення терміну служби обладнання та до 80 % зниження аварійності мережі.

Однак у вентильних двигунів є й недоліки. Зокрема існує **проблема** електромагнітної сумісності (ЕМС) вентильних двигунів з мережею живлення [1], а саме наявність електромагнітних завад — гармонічних спотворень, які генеруються в мережу живлення. Наявність гармонічних спотворень зумовлена впливом перетворювача частоти із ланкою постійного струму. Несинусоїдальні струми перетворювача частоти неминуче призводять до утворення несинусоїдальної напруги в електричному колі, яке живить перетворювач. Наслідком цього є можливі порушення в роботі пристроїв, які одержують живлення від тих же самих шин, що і перетворювач частоти [2]. Наприклад, в електродвигунах дія високочастотних складових напруги призводить до зниження ККД. Крім того, при великому складі вищих гармонік можливі істотні коливання обертового моменту і ковзання асинхронних машин [3].

На жаль, питанням ЕМС не завжди надається достатня увага. Для вирішення цієї проблеми постає **задача**, в першу чергу, вирішити питання проведення точних вимірювань і моделювання мереж живлення, яке дозволить проводити поглиблений аналіз складних процесів розповсюдження гармонік в мережах [2]. В [1] надаються орієнтовні значення вищих гармонік (ВГ) амплітудного спектру вхідної напруги ВД малої і середньої потужності. Отже, для **розв'язання поставленої задачі** необхідно провести дослідження з метою виявлення причин виникнення ВГ і визначення параметрів ВД, зміна яких призводить до погіршення ЕМС з мережею живлення.

Усі методи дослідження електромеханічних систем з перетворювачами частоти умовно можна поділити на аналітичні і методи імітаційного моделювання. Серед перших можна виділити метод змінних стану, різницевих рівнянь, методи, засновані на теоремі множення та інтегралі Дюамеля, методи на основі рядів Фур'є і Уолша, методи вірогідності [2]. Кожний з перелічених методів має свої галузі застосування, переваги і недоліки. Вони досить зручні для аналізу простих систем, але для дослідження складних систем доводиться упрощувати спрощення математичного опису об'єкта, і як наслідок спрощувати систему і знижувати точність моделі. Методи імітаційного моделювання використовуються для дослідження об'єктів в системах практично будь-якої складнос-

ті. Для розв'язання поставленої задачі вирішено застосувати комбінований напрям моделювання. Це синтез імітаційного і аналітичного моделювання і нові можливості моделювання комплексних систем електроприводу, у тому числі і систем з перетворювачами частоти. Таким чином, модель є імітаційним об'єктом дослідження, який виражається за допомогою аналітичної залежності. Для теоретичних досліджень систем електроприводу досить ефективним є використання пакету MATLAB [3], який містить у своєму складі інструмент візуального моделювання Simulink.

Імітаційна модель системи вентильного двигуна наведена на рис. 1. Це трифазний синхронний ВД, який живиться від мережі змінного струму через перетворювач частоти з проміжною ланкою постійного струму. Ротор ВД двополюсний з постійними магнітами. На роторі закріплений датчик положення ротора, який через систему управління забезпечує управління інвертуванням.

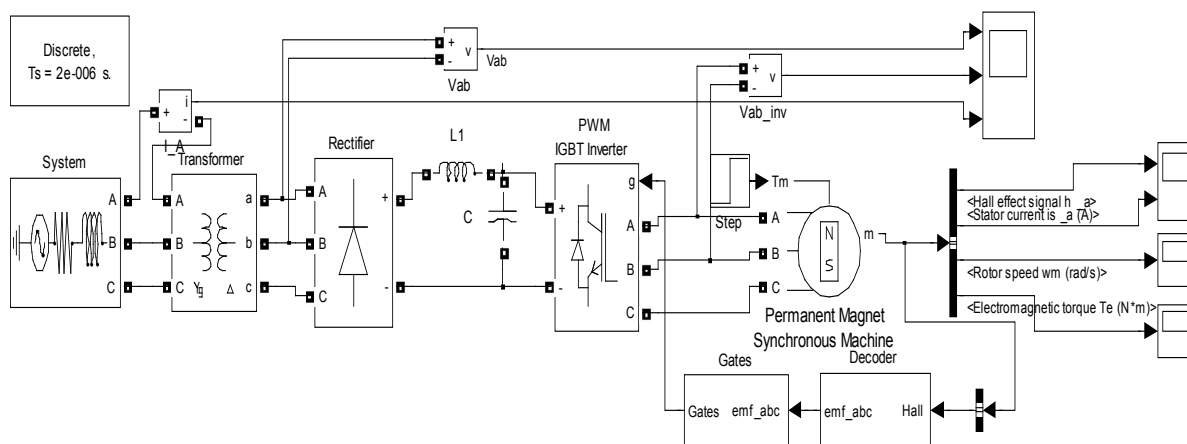


Рис. 1. Імітаційна модель вентильного двигуна з перетворювачем частоти з ланкою постійного струму

На етапі підготовки моделі системи вентильного двигуна були прийняті такі припущення:

- трифазна вентильна машина електрично симетрична, втрати в сталі не враховуються;
- повітряний зазор між статором і ротором рівномірний;
- силові транзисторні ключі мають нескінченно великий вхідний опір в закритому стані.

Параметри силових ключів є легко змінними в діалоговому режимі моделювання, що дозволяє використовувати потрібні параметри силового ключа при моделюванні різних типів перетворювачів. Так, при моделюванні випрямляча був створений трифазний діодний міст, а в якості силових ключів інвертора вибрані біполярні транзистори IGBT з діодами.

Розроблена модель дозволяє простежити залежності змін ВГ і загального коефіцієнта гармонік THD_U від зміни параметрів системи. Для того, щоб виявити вплив параметрів системи на показники якості напруги та струму мережі живлення проведені модельні експерименти, при яких змінювалися відповідні параметри в заданих границях. В ході досліджень розглядався вплив потужності короткого замикання, номінальної потужності, тривалого моменту і швидкості обертання обраного двигуна; ємності та індуктивного опору ланки постійного струму, а також активного та індуктивного опору і ємності інвертора. Отримані при моделюванні дані показали, що зміна індуктивного опору і ємності інвертора й індуктивного опору ланки постійного струму не спричиняє за собою істотних змін рівнів ВГ. Дослідження впливу номінальної потужності двигуна на якість мережного струму наведено в [4]. В роботі розглядаються тільки ті параметри, які істотно впливають на показники якості електроенергії.

Основні результати моделювання показані на рисунках 2—5.

На рис. 2—5 наведені криві і гармонічні спектри вхідної напруги і струму ВД. Крива вхідної напруги і гармонічний спектр (рис. 2) отримані при моделюванні системи з двигуном, частота обертання якого складає 2000 об/хв, тривалий момент — 10 Нм. Отриманий гармонічний склад (рис. 2б) відповідає спектру, показаному в [1]. Спостерігається відсутність 3-ї, 9-ї, 15-ї, 21-ї гармонік. Значення решти вищих гармонік порівняно невеликі. Загальне гармонічне спотворення вхідної напруги (THD_U) дорівнює 1,73 %.

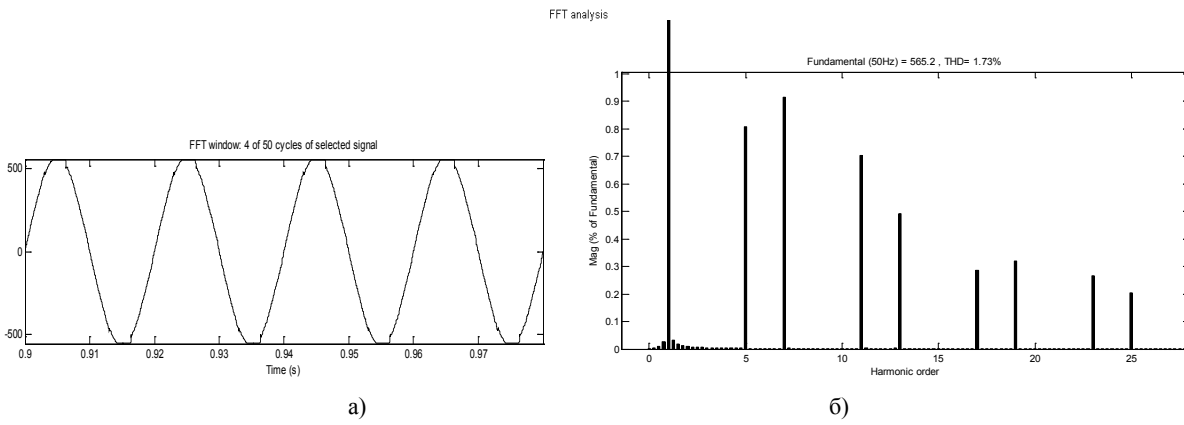


Рис. 2. Крива та гармонічний склад вхідної напруги ВД з частотою обертання 2000 об/хв

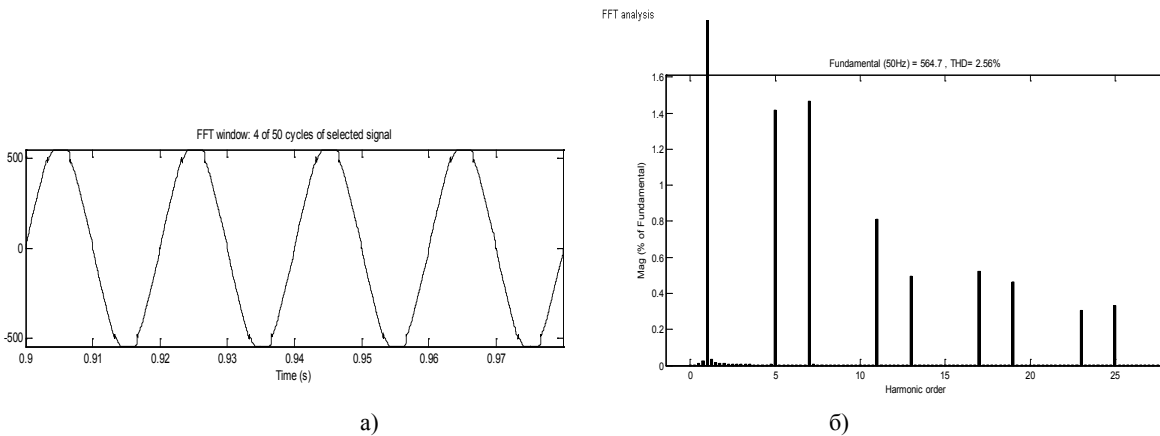


Рис. 3. Крива і гармонічний склад вхідної напруги ВД з частотою обертання 4500 об/хв

Гармонічний склад вхідної напруги ВД при частоті обертання 4500 об/хв (рис. 3) має вищі гармоніки із значеннями: 5-та — 1,42 %; 7-ма — 1,47 %; 11-та — 0,81 %; 13-та — 0,5 %; 17-та — 0,5 %; 19-та — 0,46 %; 23-тя — 0,3 %; 25-та — 0,33 %. Загальне гармонічне спотворення при цьому склало 2,56 %.

На рис. 4 показані крива і гармонічний склад вхідної напруги ВД при $C = 5$ мкФ. При порівняно невеликих значеннях вищих гармонік (5-та — 0,36 %, 7-ма — 0,18 %, 11-та — 0,15 %, 13-та — 0,12 %, 17-та — 0,15 %; 19-та — 0,13 %; 23-тя — 0,16 %; 25-та — 0,25 %) спостерігається значення $THD_U = 2,19$ %. З'являються інтергармоніки зі значеннями не більше 0,3 %.

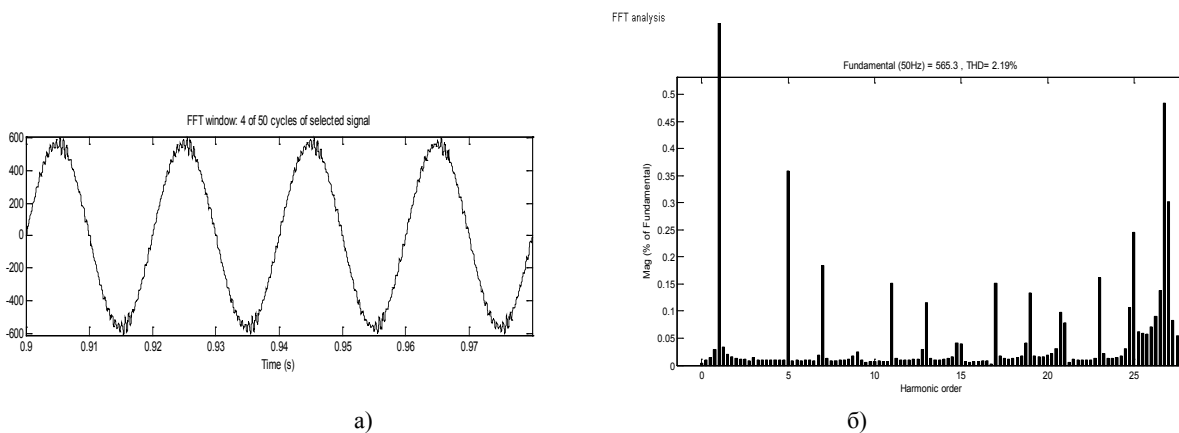


Рис. 4. Крива і гармонічний склад вхідної напруги ВД при $C = 5$ мкФ

Гармонічний склад вхідної напруги ВД при значенні активного опору інвертора $R = 50$ Ом (рис. 5) має вищі гармоніки із значеннями: 5-та — 4,25 %; 7-ма — 2,5 %; 11-та — 1,79 %; 13-та

— 1,1 %; 17-та — 1,29 %; 19-та — 0,83 %; 23-тя — 0,99 %; 25-та — 0,74 %. Загальне гармонічне спотворення при цьому склало 6,19 %.

Як впливає з наведених спектрів (рис. 2—5) значення окремих гармонік і загального гармонічного спотворення напряму залежить від параметрів ВД.

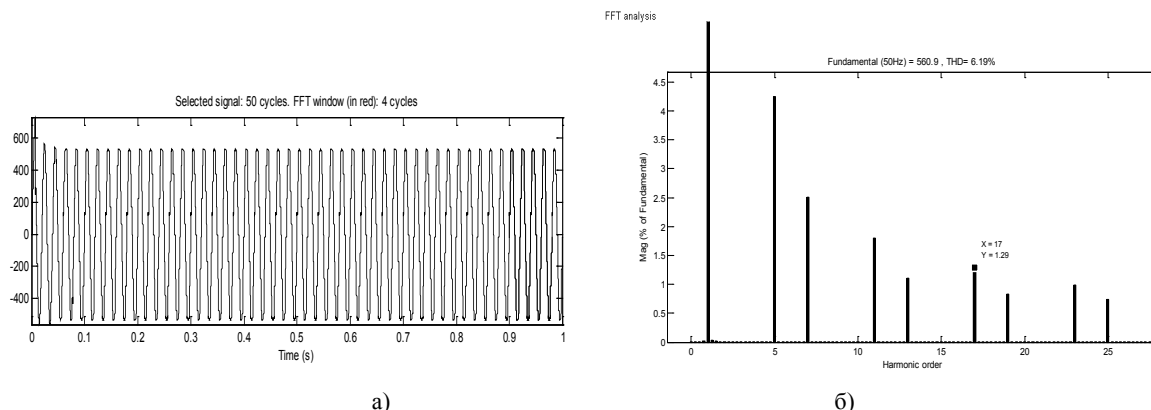


Рис. 5. Крива і гармонічний склад вхідної напруги ВД при значенні активного опору інвертування $R = 50 \text{ Ом}$

На рис. 6, 7 наведені графіки залежностей рівнів ВГ від різних параметрів ВД. На рис. 6, а наведена залежність рівнів ВГ від значення потужності короткого замикання. Зі збільшенням потужності короткого замикання від 0,1 МВА до 10 МВА спостерігається зменшення значень ВГ: 5-та, 7-ма, 11-та, 13-та гармоніки зменшуються до значення $\approx 0,5 \%$ від основної, 17-та, 19-та, 23-тя, 25-та — до 0,2 %.

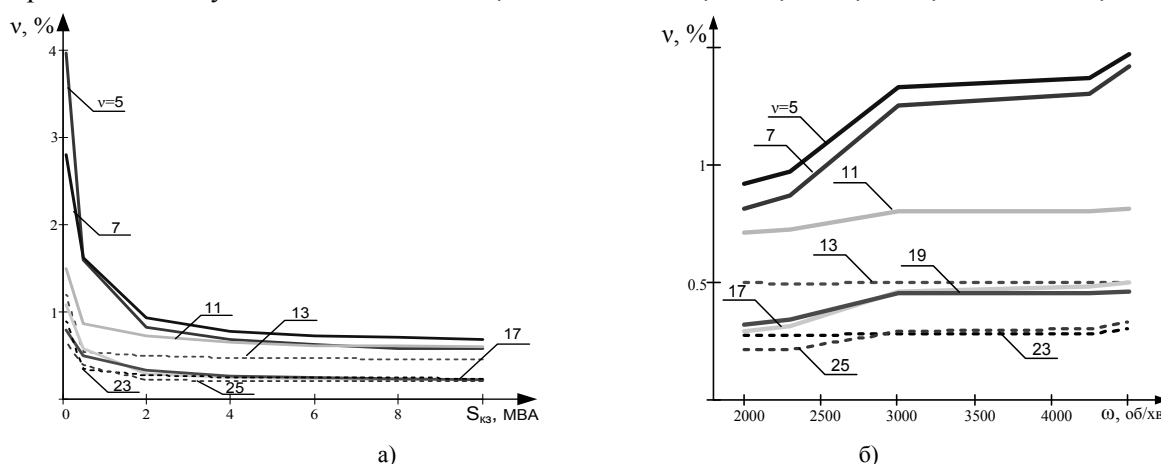


Рис. 6. Залежності рівнів ВГ а) від потужності короткого замикання; б) від частоти обертання вентильного двигуна

Як впливає з рис. 6б, зі зміною частоти обертання двигуна від 2000 до 4500 об/хв спостерігається зміна рівнів ВГ в порівняно невеликих границях: 5-та гармоніка — 0,8...1,42% від основної гармоніки, 7-та — 0,9...1,47 %, 11-та — 0,7...0,81 %.

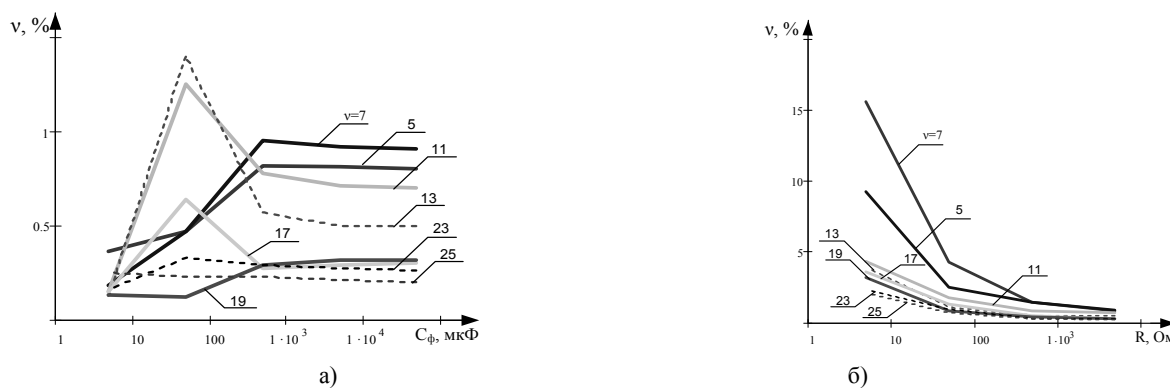


Рис. 7. Залежності рівнів ВГ а) від ємності ланки постійного струму; б) від активного опору інвертора

При зміні ємності ланки постійного струму (рис. 7а) в діапазоні $500 \div 50000$ мкФ значення рівнів ВГ практично не змінюються. В діапазоні $C = 50 \div 500$ мкФ істотно збільшуються значення 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї, 17-ї гармонік; 23-тя і 25-та ВГ практично не змінюються.

Залежності, наведені на рис. 7б, ілюструють, що при зменшенні активного опору інвертора збільшуються рівні ВГ.

Висновки

Для розгляду проблеми ЕМС ВД з мережею живлення був обраний метод комбінованого моделювання, в якому досліджувана система представлена у вигляді імітаційного об'єкта за допомогою аналітичних залежностей. В результаті проведеного моделювання системи отримані дані, необхідні для визначення впливу вищих гармонік на мережу живлення. Отримані криві вхідної напруги та амплітудні спектри ВГ з різними заданими умовами. На підставі цих даних побудовані залежності рівнів ВГ від зміни відповідних параметрів електричної системи в заданих границях. Аналіз рис. 6, 7 дозволяє зробити висновок про те, що зміни потужності короткого замикання, частоти обертання двигуна і величин ємності ланки постійного струму, а також активного опору інвертора в заданих діапазонах впливає на рівні ВГ. При зміні цих параметрів THD_U варіюється в діапазоні $1,35\% \div 21,08\%$. Таким чином, за допомогою комбінованого моделювання досліджуваної системи, можна визначити на які значення повинні бути налаштовані параметри системи, щоб рівні ВГ не перевищували значень, допустимих стандартами. В роботі розглянуті тільки канонічні гармоніки; в подальшому планується розглянути і інтергармоніки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с. — ISBN 5-283-0319-8.
2. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер; пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с. — ISBN 5-283-02458-X.
3. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / Ю. Лазарев. — СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. — 512 с. — ISBN 5-469-00600-X.
4. Бараненко Т. К. Исследование проблемы электромагнитной совместимости вентильного двигателя с питающей сетью / Т. К. Бараненко, В. Е. Саравас // Эффективность та якість електропостачання промислових підприємств: зб. праць. VI міжнародної науково-технічної конф., 21—23 травня 2008 р.: — Маріуполь: Вид-во ПДТУ, 2008. — 420 с.

Рекомендована кафедрою автоматики та інформаційно-виміральної техніки

Надійшла до редакції 21.10.08
Рекомендована до друку 20.11.08

Бараненко Тетяна Костянтинівна — доцент, **Саравас Вікторія Євгенівна** — аспірант.

Кафедра електропостачання промислових підприємств, Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь