

## МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Г.К. Кальянов, с.н.с., к.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* Розглянуто основні методи формування синусоїдального фазного струму навантаження асинхронного двигуна, що базуються на використанні широтно-імпульсної модуляції.

*Ключові слова:* асинхронний двигун, перетворювач частоти, широтно-імпульсна модуляція, синусоїдальний струм, силовий напівміст.

## МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПИТАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Г.К. Кальянов, с.н.с., к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Рассмотрены основные методы формирования синусоидального фазного тока нагрузки асинхронного двигателя, базирующиеся на использовании широтно-импульсной модуляции.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, синусоидальный ток, силовой полумост.

## METHODS OF FORMING SINUSOIDAL SUPPLY CURRENT OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH USE OF PULSE-WIDTH MODULATION

G. Kalyanov, assistant professor, cand. eng. sc., KhNADU

*Abstract.* The basic methods of forming phase sinusoidal load current induction motor, based on the use of pulse width modulation.

*Keywords:* induction motor, inverter, pulse width modulation, sinusoidal current, half bridge power.

### Вступ

Неухильне зростання кількості автотракторної техніки, що знаходиться в експлуатації, сприяє все більш суттєвим змінам природного середовища життя людини, які, якщо не вжити спеціальних заходів, можуть зробитися незворотними, що катастрофічно позначиться на існуванні всього живого на Землі, у тому числі і людства.

Один з основних шляхів зменшення навантаження на навколишнє середовище людини полягає в суттєвому підвищенні вимог до екологічності автотранспортної техніки, яка випускається в даний час або підлягає до випуску у найближчому майбутньому.

Про актуальність даного шляху вирішення задачі зменшення навантаження на довкілля свідчить неухильне підвищення обсягу випуску світовим автопромислом автомобілів з

гібридною силовою установкою, а також розробці промислових зразків автомобілів на електричній тязі. У зазначеному сегменті автомобільної техніки в якості тягового двигуна зазвичай використовується так званий "безконтактний" двигун постійного струму, який ще називають вентильним двигуном.

Даному двигуну, поряд з цілим рядом достоїнств, притаманний один серйозний недолік - висока вартість, яка обумовлена, насамперед, застосуванням в конструкції двигуна потужних постійних магнітів з рідкоземельних елементів [1].

Все, сказане вище, робить актуальним пошук альтернативних варіантів реалізації автомобільного тягового електроприводу, які, перш за все, пов'язані з використанням традиційних асинхронних двигунів змінного струму.

Однак, застосування асинхронного двигуна як електроприводу автомобіля нерозривно пов'язане з вирішенням задачі живлення цього двигуна, тобто створенням досить потужного, надійного, малогабаритного та ефективного (з високим ККД) джерела змінної синусоїдальної напруги або струму з регульованою частотою та амплітудою.

### Аналіз публікацій

Останнім часом у зв'язку з подальшим розвитком регульованого асинхронного електроприводу, зокрема застосуванням систем векторного керування асинхронним двигуном (АД), все більш широкое поширення набуває спосіб живлення його фазних обмоток від джерела синусоїдального струму [2,3].

При такому способі живлення АД швидкість обертання його ротора визначається частотою живильного струму, а амплітуда цього струму безпосередньо визначає величину моменту на валу двигуна [2].

Функціональна схема замкнутої системи частотного керування АД, відповідна відзначеному способу живлення двигуна (її спрощений варіант), представлена на рис.1 [2].

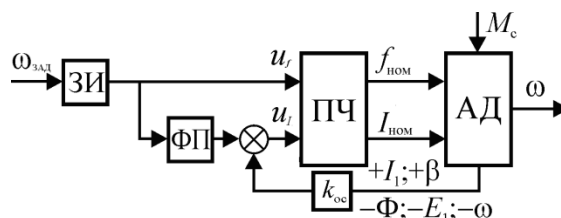


Рис. 1. Функціональна схема замкнутої системи частотного керування АД

Як випливає з цього рисунка, статор АД підключено до перетворювача частоти (ПЧ), що має два незалежні канали управління: амплітудою струму  $u_i$  і частотою  $f_{ном}$  вихідного струму. Канал управління амплітудою струму охоплений зворотним зв'язком за відповідним параметром.

Функціональний перетворювач (ФП) необхідний для формування закону керування струмом статора АД залежно від частоти, тобто частота в такій системі є незалежним параметром, що визначає швидкість обертання АД з точністю до величини ковзання.

Задатчик інтенсивності (ЗИ) служить для настройки швидкості наростання і спаду вхідного сигналу керування, що виключає електричні та механічні перевантаження. Ретельне його налаштування особливо необхідно, якщо ПЧ нереверсивний, тобто не має здатності двостороннього обміну енергією між мережею живлення і АД, тому що в цьому випадку кінетична енергія, накопичена обертовими масами, при гальмуванні буде розсіюватися в перетворювачі, створюючи неприпустимі перевантаження або навіть аварійні режими.

Вибір сигналу зворотного зв'язку визначається безліччю умов: характером навантаження, технічними вимогами до приводу, можливістю використання сигналів, формованих в інших контурах управління і т. д. Такими сигналами можуть бути: струм і ЕРС статора ( $I_1$ ,  $E_1$ ), основний магнітний потік АД ( $\Phi$ ), частота обертання ( $\omega$ ) ротора двигуна або абсолютне ковзання ( $\beta$ ).

Так, наприклад, створення зворотного зв'язку по магнітному потоку в зазорі вимагає установки датчиків Хола, по ЕРС статора - укладання вимірювальної обмотки в пази статора. Сигнали абсолютного ковзання і частоти обертання вимагають установки

тахогенератора, що найчастіше виправдано тільки в разі необхідності використання зворотного зв'язку по швидкості для отримання заданого статизму механічних характеристик. Найбільш доступним сигналом для частотного управління є струм статора, і саме він використовується в більшості приводів широкого застосування

### Мета та постановка задачі

Все сказане вище робить вельми актуальним пошук можливих методів формування синусоїдальних сигналів, використання яких дозволило б вирішити завдання живлення обмоток АД синусоїдальними струмами з регульованими величинами частоти і амплітуди. При цьому, з цілком зрозумілих причин, технічна реалізація відповідних формувачів повинна базуватися на використанні алгоритмів широтно-імпульсної модуляції [4].

### Основна частина

На рис. 2 представлена спрощена структурна схема формувача синусоїдального струму, що живить фазну обмотку  $W_\phi$  асинхронного двигуна, яка характерна для всіх методів формування цього струму

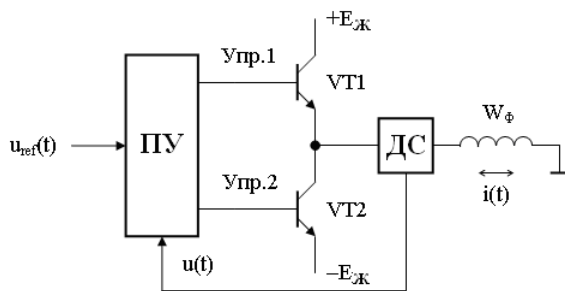


Рис. 2 - Схема структурна формувача синусоїдального фазного струму АД

Принцип дії формувача засновано:

- на властивості безрозривності струму, що протікає через фазну обмотку  $W_\phi$  двигуна, тобто через індуктивне фазне навантаження двигуна, при високочастотній комутації (підключенні і відключенні) джерел напруги  $+E_\pi$  та  $-E_\pi$ , які живлять цю індуктивність, за допомогою ключових транзисторів відповідного силового напівмосту (випадок, коли при живленні фазної обмотки асинхронного двигуна мають місце

тимчасові інтервали, в яких значення цього струму дорівнює нулю, тобто має місце так званий "розривний" струм живлення обмотки двигуна, в даній статті не розглядається, бо для цього випадку характерне досить значне (за величиною) значення коефіцієнта пульсацій для струму живлення);

- на реалізації комутації джерел живильної напруги за допомогою силового напівмосту на основі результату порівняння (з різними алгоритмічними особливостями) в пристрої управління поточного миттєвого значення напруги  $u(t)$ , величина якої пропорційна величині миттєвого значення фазного струму  $i(t)$ , і поточного миттєвого значення синусоїдальної еталонної (опорної) напруги  $u_{ref}(t)$ .

У результаті проведення зазначеної операції, яка зазвичай носить назву "імпульсна модуляція", через фазну обмотку  $W_\phi$  асинхронного двигуна протікає синусоїдальний струм  $i_{cp}(t)$ , величина якого дорівнює усередненому значенню миттєвого струму  $i(t)$ , який формується у міжкомутаційних інтервалах з ділянок експонент. При цьому справедливо наступне співвідношення:

$$i_{cp}(t) \approx \frac{u_{ref}(t)}{K_{IP}} \approx i_{ref}(t),$$

де  $i_{ref}(t)$  - еталонний (опорний) синусоїдальний фазний струм, А;  
 $K_{IP}$  - коефіцієнт перетворення датчика струму, В/А.

Враховуючи можливі алгоритмічні особливості операцій порівняння, які виконуються в пристрої управління формувача, то серед них можна виділити чотири основних алгоритму, які визначають наступні методи формування синусоїдального току живлення фазної обмотки АД:

- мінімаксий методу формування;
- методу формування із заданим значенням пікового струму;
- методу формування із заданою шириною струмового коридору;
- методу формування із заданим значенням середнього струму.

Цілком зрозуміло – реалізація зазначених вище методів формування синусоїдальних струмів живлення обмоток асинхронного двигуна на практиці визначається

схемотехнічними особливостями побудови відповідних технічних пристроїв (пристроїв управління), які зазвичай носять назву - імпульсний модулятор.

Тимчасові діаграми, що ілюструють особливості формування фазних струмів живлення АД при реалізації кожного з перерахованих вище чотирьох методів їх формування, представлені на рис. 3.3...3.6, відповідно. На цих тимчасових діаграмах відображена зміна в тимчасових координатах значень наступних параметрів:

- миттєвого значення струму  $i(t)$ , що протікає по фазній обмотці АД, А;
- еталонного (опорного) синусоїдального струму  $i_{ref}(t)$ , А;
- середнього значення формованого синусоїдального фазного струму АД  $i_{cp}(t)$ , А.

### Мінімакний метод формування синусоїдального струму

Особливості формування синусоїдального фазного струму асинхронного двигуна при використанні мінімаксного методу наочно ілюструє тимчасова діаграма, яка представлена на рис. 3.

Як впливає з цієї діаграми, при використанні даного методу формування синусоїдального струму  $i_{cp}(t)$  двигуна його миттєві значення  $i(t)$  змінюються (з великою частотою перемикання) за експоненціальним законом. При цьому, діапазон зміни даного струму обмежений нульовим значенням, з одного боку, і значеннями, що задаються еталонним (опорним) струмом  $i_{ref}(t)$ , що змінюються за синусоїдальним законом, з іншого боку.

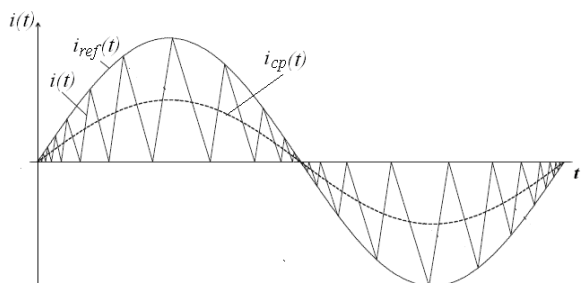


Рис. 3 - Тимчасова діаграма для випадку використання мінімаксного методу формування фазного струму АД

Амплітудне значення формованого синусоїдального струму  $i_{cp}(t)$  пропорційне

сумарної площі трикутних імпульсів миттєвого струму  $i(t)$ , що припадають на напівперіод формованого струму.

**Достоїнства методу** – простота технічної реалізації.

**Недоліки методу** – значна відміна амплітуд  $i_{cp}(t)$  і  $i_{ref}(t)$ , велике значення амплітуди змінної (пилкообразної) складової синусоїдального току  $i_{cp}(t)$ , змінна частота комутації ключових транзисторів силового напівмосту.

### Метод формування синусоїдального струму з заданим значенням пікового струму

Особливість формування фазного струму асинхронного двигуна при використанні зазначеного методу наочно ілюструється тимчасовою діаграмою, яка представлена на рис. 4.

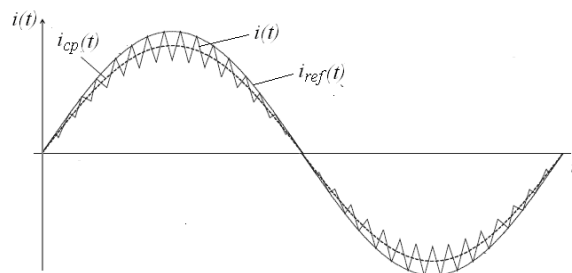


Рис. 4 - Тимчасова діаграма для випадку використання методу формування фазного струму АД із заданим значенням пікового струму

Як впливає з цієї тимчасової діаграми, при використанні даного методу при формуванні синусоїдального фазного струму двигуна  $i_{cp}(t)$  верхня межа зміни миттєвого значення цього струму  $i(t)$  обмежена значеннями, що задаються еталонним (опорним) струмом  $i_{ref}(t)$ , який змінюється за синусоїдальним законом. Що ж до нижньої межі зміни струму  $i(t)$ , то її значення формуються автоматично за рахунок витримки фіксованого тимчасового інтервалу  $\tau$  щодо моменту часу рівності струмів  $i(t)$  і  $i_{ref}(t)$ .

При використанні зазначеного методу формування фазного струму АД його

усереднене значення  $i_{cp}(t)$  дещо відрізняється від значення струму  $i_{ref}(t)$  (див. рис. 3.4). Однак величина цього відмінності може бути мінімізована за рахунок зменшення часового інтервалу  $\tau$ .

**Достоїнства методу** – незначна відміна амплітуд  $i_{cp}(t)$  і  $i_{ref}(t)$ , незначне значення амплітуди змінної (пилкообразної) складової синусоїдального току  $i_{cp}(t)$ , постійна частота комутації ключових транзисторів силового напівмосту.

**Недоліки методу** – підвищене значення частоти комутації ключових транзисторів силового напівмосту.

### Метод формування синусоїдального струму з заданим значенням ширини струмового коридору

Особливість формування фазного струму асинхронного двигуна при використанні зазначеного методу наочно ілюструється тимчасовою діаграмою, яка представлена на рис. 5.

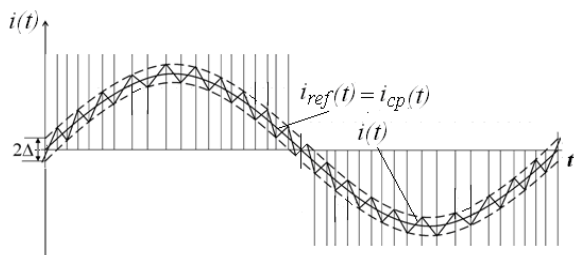


Рис. 5 - Тимчасова діаграма для випадку використання методу формування фазного струму АД із заданим значенням ширини токового коридору

Як впливає з цієї тимчасової діаграми, при використанні даного методу при формуванні синусоїдального фазного струму двигуна  $i_{cp}(t)$ , верхня і нижня межі зміни миттєвого значення струму  $i(t)$  ( $i_{BM}(t)$  і  $i_{HM}(t)$ , відповідно) задаються співвідношеннями:

$$i_{BM}(t) = i_{ref}(t) + \Delta \quad i_{HM}(t) = i_{ref}(t) - \Delta,$$

де  $2\Delta$  - величина заданого гістерезису (ширина струмового коридору).

При використанні даного методу формування фазного струму АД його усереднене значення  $i_{cp}(t)$  практично

збігається зі значенням струму  $i_{ref}(t)$ . Крім того, характерною особливістю зазначеного методу формування фазного струму АД є змінна частота комутації ключів силового напівмосту.

**Достоїнства методу** – незначна відміна амплітуд  $i_{cp}(t)$  і  $i_{ref}(t)$ , незначне і постійне значення амплітуди змінної складової синусоїдального току  $i_{cp}(t)$ .

**Недоліки методу** – змінна частота комутації ключових транзисторів силового напівмосту. підвищене значення частоти комутації ключових транзисторів силового напівмосту.

### Метод формування синусоїдального струму з заданим значенням середнього струму

Особливість формування фазного струму асинхронного двигуна при використанні зазначеного методу наочно ілюструється тимчасовою діаграмою, що представлена на рис. 6.

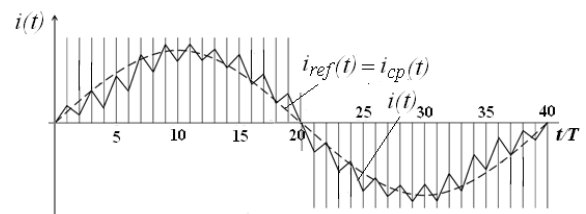


Рис. 6 - Тимчасова діаграма для випадку використання методу формування фазного струму АД із заданим значенням середнього струму

При використанні даного методу формування фазного струму двигуна  $i_{cp}(t)$  моменти комутації ключів силового напівмоста синхронізуються імпульсами відповідної імпульсної послідовності. Причому, період проходження  $T$  імпульсів у зазначеній послідовності постійний. При цьому, якщо поточне значення фазного струму  $i(t)$  перевищує значення  $i_{ref}(t)$ , тобто

$$i(t) > i_{ref}(t),$$

то верхній ключовий транзистор напівмоста закривається, а нижній – відкривається (див.

рис. 1). В іншому випадку, коли

$$i(t) < i_{ref}(t),$$

встановлюється протилежний стан транзисторів напівмоста.

Як впливає з представленої діаграми величина формованого синусоїдального струму  $i_{cp}(t)$  практично збігається зі значенням  $i_{ref}(t)$ . При цьому величина пульсацій формованого струму може бути задана шляхом відповідного вибору значення періоду  $T$  проходження імпульсів у послідовності синхронізації.

**Достоїнства методу** – незначна відміна амплітуд  $i_{cp}(t)$  і  $i_{ref}(t)$ , незначне значення амплітуди змінної складової синусоїдального току  $i_{cp}(t)$ .

**Недоліки методу** – змінне значення амплітуди змінної складової синусоїдального току  $i_{cp}(t)$ , підвищене значення частоти комутації ключових транзисторів силового напівмосту.

### Висновки

На підставі матеріалів, наведених у статті можна зробити такі основні висновки:

- для всіх чотирьох описаних методів формування синусоїдального фазного струму  $i_{cp}(t)$  АД, які базуються на використанні при цьому способів широтно-імпульсної модуляції, характерна пилкоподібна форма зміни миттєвого значення струму  $i(t)$ , що тече по фазній обмотці АД, а точніше, форма струму, що складається з початкових ділянок зростаючих і падаючих за величиною експонент різної амплітуди;
- максимальна величина коефіцієнта пульсацій характерна для мінімаксного методу формування синусоїдального струму;

- постійна величина коефіцієнта пульсацій характерна для методів формування синусоїдального струму з заданим значенням величини струмового коридору;
- мінімальна величина коефіцієнта пульсацій характерна для методу формування синусоїдального струму з заданим значенням середнього струму;
- для мінімаксного методу і методу формування синусоїдального струму з заданим значенням величини струмового коридору характерна змінна частота комутації транзисторів силового напівмоста;
- постійна або кратна частота комутації транзисторів силового напівмоста характерна для методів формування синусоїдального струму з заданим значенням пікового та середнього струмів.

### Література

1. И.Е. Овчинников. Вентильные двигатели и привод на их основе / Курс лекций. – СПб.: Корона – Век, 2006. – 336 с.
2. А.А. Усольцев. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИНТО, 2006. – 94 с.
3. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
4. Р Мэк. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. – М.: Додека, 2008. – 272 с.

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

Стаття поступила в редакцію 30.04.2015