

УДК 621.314.57

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/04>**Голощанов С.С.**

Херсонська державна морська академія

Колебанов О.К.

Херсонська державна морська академія

Іванов А.А.

Херсонська державна морська академія

ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Асинхронні машини в основному використовуються як двигуни через їх підвищену надійність і просту конструкцію. Вони знаходять широке застосування в різних галузях промисловості і є основними споживачами електроенергії в морській промисловості. Незважаючи на численні переваги, асинхронні машини мають помітний недолік – погане регулювання швидкості. Серед методів регулювання швидкості, таких як зміна кількості пар полюсів, введення опору в ланцюг ротора, регулювання напруги живлення або зміна частоти мережі електроживлення, метод регулювання частоти з проміжним перетворенням напруги трифазного кола є на даний момент вважається найбільш прийнятним. Ця перевага зумовлена сучасною силовою електронною інфраструктурою, яка перетворює напругу в постійний струм і згодом формує напругу змінної частоти за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Хоча цей метод дозволяє отримати змінну напругу з потрібною частотою та синусоїдальною формою сигналу, він пов'язаний зі значними втратами на перемикання в комутаторах інвертора. Це зумовлює необхідність використання складних систем рідинного охолодження. Однак ці втрати можна значно зменшити, якщо перемикачі інвертора генеруватимуть напругу прямокутної форми з потрібною частотою. Потім ця напруга використовується для живлення двигуна через запропонований перетворювач, який нейтралізує вищі гармоніки шляхом придушення третьої, п'ятої, сьомої та кратних їм гармонік. Третя гармоніка пригнічується трифазною обмоткою, яка служить виходом пристрою і з'єднана в трипроменево зірку. П'ята гармоніка пригнічується п'ятифазною обмоткою, що живиться від інвертора та з'єднана у конфігурацію п'ятипроменевої зірки, тоді як сьома гармоніка пригнічується семифазною обмоткою, з'єднаною у правильний короткозамкнений семикутник. Як п'ятифазна, так і семифазна обмотки перетворювача отримані з сегментів трифазних обмоток за допомогою зигзагоподібного з'єднання. Також наведено розрахунок складових п'яти- та семифазної обмоток із частин трифазної обмотки. Додатково включено аналіз втрат у семифазній обмотці відносно первинних втрат у трифазній обмотці.

Ключові слова: фаза, гармоніки, обмотка, перетворювач, втрати, асинхронний двигун.

Постановка проблеми. Трифазний асинхронний двигун (АД) в даний час є основним типом електродвигунів у промисловості і на судах морського флоту. Широке застосування трифазні АД отримали завдяки простоті пристрою, зручності обслуговування та високій надійності в експлуатації.

Застосування асинхронного приводу в підйомних судових механізмах, насосах і вентиляторах з регульованою продуктивністю передбачає плавне регулювання швидкості в широких межах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Один із відомих способів плавного регулювання швидкості АД – введенням опору в ланцюг ротора [1, с. 345] – має незадовільні енергетичні характеристики і не може бути рекомендований для

тривалого режиму роботи. Крім того, він можливий тільки для двигуна з фазним ротором, що здорожує двигун та ускладнює його експлуатацію. Регулювання швидкості обертання зміною величини напруги живлення може застосовано тільки для двигунів з м'якою механічною характеристикою (АД з масивним феромагнітним ротором) і не може бути використане для АД з короткозамкненою клітиною через вузький діапазон регулювання [1, с. 343].

В даний час, в основному, застосовують частотне регулювання – найбільш плавний та економічний спосіб регулювання швидкості короткозамкнених АД, що забезпечує широкий діапазон регулювання (до 12:1 і вище) за досить жорстких

механічних характеристик [1, с. 340]. Однак здійснення даного способу регулювання вимагає наявності спеціальних перетворювачів частоти, тип яких визначає схему частотного управління АТ. На судах застосовуються головним чином напівпровідникові перетворювачі, що формують напругу заданої частоти з джерела постійного струму – інвертори.

Відомо спосіб одержання симетричної трифазної напруги від джерела постійного струму за допомогою трифазного мостового інвертора [2, с. 5]. При цьому комутація перемикаючих ключів може бути здійснена кількома способами.

Перший з них – найбільш простий – формування трифазної напруги прямокутної форми. Подібний режим сприятливо позначається на величині комутаційних втрат у перемикаючих ключах інвертора – перемикання відбувається тільки два рази за півперіода. Однак прямокутна форма напруги містить увесь спектр непарних гармонік. Наявність же вищих гармонійних, особливо третьої, п'ятої й сьомої, суттєво спотворюють форму вихідної напруги відносно синусоїдальної і роблять її непридатною для живлення більшості споживачів.

Другий спосіб – використання частотних фільтрів, настроєних на відповідні гармоніки. [3, с. 118]. Однак при їх застосуванні форма вихідної напруги буде також залежати від величини й характеру навантаження. Загальним же недоліком фільтрів є їхня велика встановлена потужність, а отже, великі габаритні розміри й маса. Крім того, ступінь придушення гармонік залежить від характеристики фільтра й ніколи не буває 100 процентною.

Відомо також векторний спосіб синтезування синусоїдальної напруги, який полягає в тому, що вихідна напруга перетворювача формується з вихідних напруг кількох інверторів, що мають відповідні фазу й частоту й включених послідовно на стороні змінного струму. [3, с. 163]. При такому способі принципово можна одержати на виході синусоїдальну напругу з будь-якою наперед заданою точністю при різних варіантах з'єднання вихідних ланцюгів інверторів. Однак, щоб реально досягтися вихідної напруги з формою, близькою до синусоїдальної, потрібна дуже велика кількість дискретизацій рівнів вихідних інверторів, що, природно, складно й дорого.

Практично чистий синусоїдальний сигнал можна одержати за допомогою інвертора, вихідний сигнал якого формується способом широтно-імпульсної модуляції. [3, с. 134]. Однак

цей спосіб має дуже великий рівень комутаційних втрат – приблизно на порядок більше, ніж при формуванні вихідної прямокутної напруги, що приводить до дуже трудомістким і складним (в основному, рідинним) системам охолодження ключів інвертора.

Мета статті полягає в розрахунку і аналізі роботи трифазного перетворювача прямокутної напруги в синусоїдальну на базі багатообмоткового трифазного трансформатора.

Виклад основного матеріалу. У запропонованому рішенні в одному перетворювачі одночасно нейтралізуються третя, п'ята, сьома і кратні їм гармоніки.

Це досягається тим, що вихідна постійна напруга інвертором перетворюється в змінну прямокутну, третя гармоніка якої нейтралізується системою обмоток, включених у трипроменеву зірку, п'ята гармоніка нейтралізується обмотками, включеними в п'ятипроменеву зірку, а сьома – обмотками, включеними в правильний семикутник, замкнений накоротко [4].

При цьому вихід перетворювача передбачається трифазним, а вхід – п'ятифазний, у зв'язку із чим інвертор необхідно виконати п'ятифазним. Оскільки n -фазна система не містить гармонік, кратних n , у вихідній кривій перетворювача будуть відсутні 3-я, 5-я й кратні їм гармоніки. Сьома й кратні їй гармоніки виключаються за допомогою додаткової семифазної обмотки, з'єднаної в правильний замкнений семикутник. Крім того, у п'ятифазному інверторі рівень комутаційних втрат у перемикаючому ключі інвертора в 5/3 рази нижче, чим у прототипі й на порядок нижче, ніж при широтно-імпульсній модуляції. Схему пристрою представлено на рис. 1.

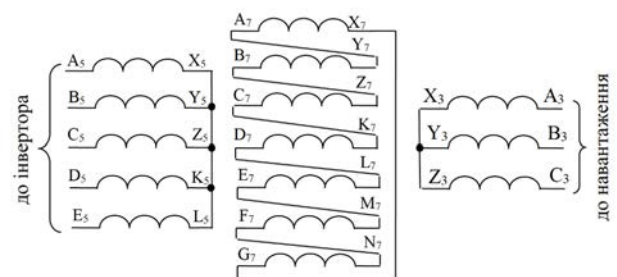


Рис. 1. Схема перетворювача

Нейтралізація зазначених гармонік здійснюється за допомогою багатообмоткового трифазного трансформатора, п'яти- і семифазні обмотки якого можна одержати способом з'єднання обмоток зигзаг [1, с. 153].

Нехай вихідна трифазна зірка представлена на рис. 2 у вигляді векторів A_3, B_3, C_3 , зсунутих на 120° і нехай усі вихідні вектори рівні 1, тобто

$$A_3 = B_3 = C_3 = 1.$$

В комплексній формі запису

$$A_3 = 1, \quad B_3 = e^{-j120^\circ} = -0,5 - j0,866, \\ C_3 = e^{j120^\circ} = -0,5 + j0,866.$$

У п'ятифазній зірці кут зсуву фаз $\frac{360}{5} = 72^\circ$ і нехай усі вектори, що одержуються, також рівні 1, тобто $A_5 = B_5 = C_5 = D_5 = E_5 = 1$.

Тоді в комплексній формі запису

$$A_5 = 1, \quad B_5 = e^{-j72^\circ} = 0,309 - j0,951, \\ C_5 = e^{-j144^\circ} = -0,809 - j0,858, \\ D_5 = e^{j144^\circ} = -0,809 + j0,858, \quad E_5 = e^{j72^\circ} = 0,309 + j0,951.$$

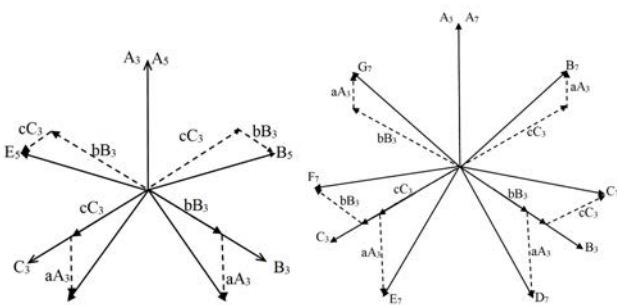


Рис. 2. П'яти- і семипроменеві зірки

Формуємо кожну з фаз п'ятифазної системи із частин векторів A_3, B_3, C_3 (система обмоток зигзаг у трифазному трансформаторі) як показано на рис. 2, тобто

$$\text{фаза } A_5 \quad A_5 = A_3 = 1, \\ \text{фаза } B_5 \quad B_5 = cC_3 + bB_3, \\ \text{Або}$$

$$0,309 - j0,951 = c(-0,5 + j0,866) + b(-0,5 - j0,866).$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно b і c , одержуємо:

$$b = 0,24, \quad c = -0,858.$$

Знак «-» вказує на те, що ця частина вектору C_5 береться зі зворотним вектору C_3 напрямком.

Значення b і c показують часткове значення векторів B_3 і C_3 при формуванні одиничного вектору B_5 .

Аналогічно розраховуються решта векторів п'ятифазної системи. Результати розрахунків зведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вектори п'ятифазної системи

Вектор	A_5	B_5	C_5	D_5	E_5
a	1	0	-0,4695	-0,4695	0
b	0	0,24	0,679	0	-0,858
c	0	-0,858	0	0,679	0,24

У семифазній зірці (рис. 2) кут зсуву фаз

$$\frac{360}{7} = 51,43^\circ$$

нехай усі одержувані вектора також рівні 1, тобто $A_7 = B_7 = C_7 = D_7 = E_7 = F_7 = G_7 = 1$.

Тоді в комплексній формі запису

$$A_7 = 1, \quad B_7 = e^{-j51,43^\circ} = 0,624 - j0,782, \\ C_7 = e^{-j102,86^\circ} = -0,223 - j0,975, \\ D_7 = e^{-j154,29^\circ} = -0,901 - j0,434, \\ E_7 = e^{-j205,72^\circ} = -0,901 + j0,434, \\ F_7 = e^{-j257,15^\circ} = -0,273 + j0,962, \\ G_7 = e^{-j308,58^\circ} = 0,624 + j0,782.$$

Аналогічно формуємо кожну з фаз семифазної системи із частин векторів A_3, B_3, C_3 як показано на рис. 3, тобто

$$\text{фаза } A_7 \quad A_7 = A_3 = 1, \\ \text{фаза } B_7 \quad B_7 = cC_3 + aA_3, \\ \text{Звідки } a = 0,1725, \quad c = -0,903.$$

Результати розрахунків векторів семифазної системи зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Вектори семифазної обмотки

Вектор	A_7	B_7	C_7	D_7	E_7	F_7	G_7
a	1	0,1725	0	-0,651	-0,651	0	0,1725
b	0	0	0,786	0,501	0	-0,565	-0,903
c	0	-0,903	-0,34	0	0,501	0,829	0

П'ятифазна обмотка виключає в кривій м.р.с. гармоніки, кратні 5, і в першу чергу, п'яту гармоніку, трифазна обмотка виключає гармоніки, кратні 3, і в першу чергу, третю гармоніку.

Семифазну обмотку з'єднуємо в правильний семикутник. У такому включенні семифазна обмотка виділяє сьому гармоніку й замикає її на себе. Для інших гармонік: першої (основної), третьої й п'ятої вона ніякого впливу не виявляє, оскільки сума векторів симетричних три- і п'ятифазних систем дорівнює 0.

Таким чином, семикутник не надає впливу на першу, третю й п'яту гармоніки, а тільки виділяє сьому. Оскільки семикутник замкнений коротко, усередині нього тече струм семиразової частоти. Але, якщо він тече усередині семикутника, сьома гармоніка буде виділятися усередині перетворювача у вигляді втрат і вона не буде міститися на виході перетворювача. Виходячи з викладеного, можна затверджувати, що пристрій нейтралізує третю, п'яту, сьому й кратні їм гармоніки. Найближчі, що залишилися, 11-а й 13-а гармоніки мають малі амплітуди й не надають істотного впливу на форму вихідної напруги.

Втрати у семифазній обмотці.

Втрати трифазної обмотці можна визначити звичайним способом.

У п'ятифазній – так само, як і в трифазній, але тільки врахувати, що кожна з обмоток фаз B_5, C_5, D_5, E_5 отримана за способом з'єднання обмоток у зигзаг та їх омичний опір являє собою суму складових кожної із зазначених фаз.

Для семифазної обмотки поступимо наступним чином.

Нехтуючи активним опором семифазної обмотки, визначимо струм у ній, враховуючи, що вона замкнена накоротко:

$$I_7 \approx \frac{U_7}{x_{k7}},$$

де U_7 – фазна напруга сьомої гармоніки, x_{k7} – індуктивний опір розсіювання фази семифазної обмотки.

Як відомо [5, с. 142], при розкладанні в ряд Фур'є періодичної функції прямокутного виду зі шпаруватістю 2 отримуємо:

$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right).$$

З наведеної формули випливає, що сьома гармоніка складає в пайовому відношенні $\frac{1}{7}$ від основної. Тоді $I_7 = \frac{U_1}{7x_{k7}}$, де U_1 – фазна напруга першої гармоніки. Але, оскільки частота сьомої гармоніки в 7 разів вище, ніж частота основної, її індуктивний опір також у 7 разів більше, ніж в основний, тобто

$$I_7 = \frac{U_1}{7 \cdot 7x_{k3}} \approx 0,02 I_{k33},$$

де $\frac{U_1}{x_{k3}} \approx I_{k33}$ – струм короткого замикання трифазної обмотки,

x_{k3} – індуктивний опір розсіювання фази трифазної обмотки.

При цьому активним опором цієї обмотки також нехтуємо.

Але струм короткого замикання трифазної обмотки пов'язаний із її номінальним струмом I_{k33} співвідношенням

$$I_{k33} = I_{k33} \frac{100}{u_{k3\%}},$$

де $u_{k3\%}$ – напруга короткого замикання у %.

Звідки слідкує

$$I_7 = \frac{2}{u_{k3\%}} I_{k33}.$$

Якщо задатися умовою, що щільності струму в трифазній та семифазній обмотках рівні, то переріз семифазної обмотки має бути зменшеним у $\frac{2}{u_{k3\%}}$ разів. У цю ж кількість разів збільшиться її активний опір, тобто $r_7 = \frac{r_3}{2} u_{k3\%}$, де r_3 – активний опір трифазної обмотки.

Тоді омичні втрати в семифазній короткозамкненій обмотці дорівнюватимуть

$$P_{k37} = 7 \cdot I_7^2 \cdot r_7 = 7 \left(\frac{2}{u_{k3\%}} \right) \cdot I_{k33}^2 r_1 = \frac{14}{u_{k3\%}} P_{k31},$$

де $I_{k33}^2 r_3 = P_{k33}$ – омичні втрати у трифазній обмотці.

З виведеного співвідношення випливає, що при $u_{k3\%} = 10\%$ між трифазною та семифазною обмоткою втрати в короткозамкненій семифазній обмотці складуть 1,4 від втрат трифазної обмотки, при $u_{k3\%} = 14\%$ втрати в трифазній та семифазній обмотках будуть рівні.

Збільшення опору семифазної обмотки в $\frac{2}{u_{k3\%}}$ раз є наближенням, тому що не враховує того, що кожна з її фаз (крім фази А7) складається з двох напівобмоток трифазної системи, що належить різним фазам. Для уточнення цього параметра необхідно скласти по модулю всі складові обмоток зигзаг, а саме:

$$1 + 0,1725 + 0,903 + 0,786 + 0,34 + 0,501 + 0,651 + 0,501 + 0,651 + 0,829 + 0,565 + 0,903 + 0,1725 = 7,975.$$

Величина $\frac{7,925}{7} \approx 1,14$ визначає додаткове збільшення сумарного омичного опору семифазної обмотки з допомогою побудови її складових шляхом з'єднання обмоток зигзаг.

Аналогічно збільшення опору у п'ятифазній обмотці за рахунок її формування за типом зигзаг визначиться як

$$1 + 0,24 + 0,858 + 0,679 + 0,4695 + 0,679 + 0,4695 + 0,858 + 0,24 = 5,493$$

Коефіцієнт збільшення втрат для п'ятифазної обмотки визначиться як $\frac{5,493}{5} \approx 1,1$.

Уточнене значення втрат у семифазній обмотці визначиться як

$$P_{k7y} = 1,13 P_{k37} = \frac{16}{u_{k3\%}} P_{k33},$$

а з урахуванням відмінності діаметрів обмоток

$$P_{k7} = \frac{16}{u_{k3\%}} P_{k33} \frac{D_7}{D_3},$$

де D_3 та D_7 – діаметри трифазної та семифазної обмотки відповідно.

Висновки. Стаття розглядає інноваційні методи управління швидкістю обертання асинхронних двигунів, з особливим акцентом на зменшення комутаційних втрат та нейтралізацію гармонік. Пропонується новий підхід, використовуючи перетворювач для формування синусоїдальної напруги з прямокутної. Запропонований перетворювач прямокутної напруги в синусоїдальну відрізняється підвищеною надійністю, простотою конструкції і обслуговування а також дозволяє відмовитись від рідинних систем охолодження ключів інвертора. Увага приділяється нейтралізації

третьої, п'ятої та сьомої гармонік за допомогою спеціально спроектованих обмоток. Аналіз втрат у семифазній обмотці відносно трифазної демонструє ефективність запропонованого методу. Цей

підхід може значно підвищити ефективність та знизити витрати на охолодження в асинхронних приводах, зокрема в морській індустрії та інших галузях промисловості.

Список літератури:

1. Белікова Л.Я., Шевченко В.П. Електричні машини: навч. посібник. Одеса, 2012. 480 с.
2. Трифазний мостовий автономний інвертор струму. Донецький національний технічний університет. URL: <https://studfile.net/preview/5685496/page:5/> (дата звернення 26.12.2023).
3. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти. Київ, 2020. 300 с.
4. Спосіб одержання трифазної синусоїдальної напруги і пристрій для його здійснення: пат. 117170 Україна: МПК6, H02M 7/00, H02M 7/42, H02M 7/497. № a201610005; заявл. 30.09.2016; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 5 с.
5. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. Львів: Львівська політехніка, 2012. 312 с.

Gogloschapov S.S., Kolebanov O.K., Ivanov A.A. INNOVATIVE REGULATION METHOD SPEED QUALITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Asynchronous machines are mainly used as motors. Due to the increased reliability and simplicity of the design, they are widely used in industry and on ships of the marine fleet, being the main consumers of electrical energy. Despite the mentioned advantages, they have a significant drawback – poor adjustment of the rotation speed. Of all the used methods of speed regulation: by changing the number of pole pairs, introducing resistance into the rotor circuit, changing the value of the supply voltage, changing the frequency of the power supply network, the frequency control method with intermediate conversion of the three-phase circuit voltage should be recognized as the most acceptable at present, thanks to the modern power electronic base into direct current and further formation of a given variable frequency voltage by the method of pulse width modulation (PWM). Although this method allows you to obtain a variable voltage of a given frequency with a sinusoidal shape of the curve, it has significant switching losses in the inverter keys, which leads to the need to use complex liquid cooling systems. These losses can be significantly reduced if the inverter keys generate a voltage of a given frequency of a rectangular shape, which is used to feed the engine through the proposed converter, in which the neutralization of higher harmonics is carried out by suppressing the third, fifth, seventh and multiples of harmonics. At the same time, the third harmonic is suppressed by a three-phase winding, which is the output of the device and connected in a three-beam star, the fifth by a five-phase winding fed from the inverter and connected in a five-beam star, the seventh by a seven-phase winding connected in a regular heptagon, closed briefly. The five-phase and seven-phase windings of the converter are formed from parts of three-phase windings by the zigzag connection type, the calculation of the components of five- and seven-phase windings from parts of three-phase is given. An analysis of the losses in the seven-phase winding relative to the main losses of the three-phase winding is also given.

Key words: phase, harmonics, winding, converter, losses, asynchronous motor.