

УДК 621.313

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНО-ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРИ ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Ю. В. Шуруб

Інститут електродинаміки НАН України
просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail:shurub@bigmir.net

Запропоновано систему керування трифазно-однофазного асинхронного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем, що дозволяє отримати симетричний режим у широкому діапазоні зміни навантаження, що має випадковий характер. Розроблена методика моделювання навантажень, що мають стохастичний характер. Визначено передаточну функцію оптимального фільтру керуючого мікропроцесорного пристрою при навантаженнях з різним спектром.

Ключові слова: асинхронний електропривод, фазозміщуючий модуль, випадкове навантаження.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНО-ОДНОФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗКАХ

Ю. В. Шуруб

Інститут електродинаміки НАН України
просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина. E-mail:shurub@bigmir.net

Предложена система управления трехфазно-однофазного асинхронного электропривода с трехэлементным фазосдвигающим модулем, которая позволяет получить симметричный режим в широком диапазоне изменения нагрузки, имеющей случайный характер. Разработана методика моделирования нагрузок, имеющих стохастический характер. Определена передаточная функция оптимального фильтра управляющего микропроцессорного устройства при нагрузках с различным спектром.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, фазосдвигающий модуль, случайная нагрузка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Врахування стохастичного характеру навантажень широкого класу електроприводів, що використовуються в механізмах сільсько-господарського та комунального господарств, дозволяє підвищити ефективність роботи таких електроприводів за рахунок більш точного визначення їх параметрів та врахування характеру навантаження в системі керування. Значною мірою це стосується і асинхронних електроприводів на базі трифазного двигуна, що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів.

У трифазних асинхронних двигунах (АД), що живляться від однофазної мережі через одноелементний фазозміщуючий модуль (трифазно-однофазний електропривод (ЕП)), симетричну систему напруг на фазних обмотках АД можливо отримати тільки при одному значенні коефіцієнту потужності $\cos\phi$ (при $\cos\phi = 0,5$ для схеми Штейнметца, при $\cos\phi = 0,707$ – для послідовно-паралельної схеми). При інших значеннях коефіцієнту потужності симетричну систему отримати принципово неможливо. Для роботи при інших значеннях коефіцієнту потужностей ємність фазозміщуючого конденсатора вибирають з умов отримання мінімуму струмів зворотної послідовності або мінімуму коефіцієнту несиметрії [1]. При цьому, однак, втрати в АД будуть більшими, ніж у симетричному режимі, і можуть перевищувати допустимі, особливо поблизу неробочого ходу при виборі величини ємності конденсатора з умов мінімуму коефіцієнту несиметрії при номінальному навантаженні. При роботі трифазно-однофазного ЕП у широкому діапазоні зміни навантажень виникає необхідність регулювати або ємність фазозсуваючого конденсатора, або напругу живлення ЕП, хоча навіть у цьому разі коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна буде меншим, ніж у симетричному режимі.

У трифазно-однофазних електроприводах з триелементним фазозміщуючим модулем [2] можливо отримати симетричну систему фазних напруг у діапазоні зміни коефіцієнту потужності $0,5-0,88$, що відповідає зміні $\cos\phi$ АД загальнопромислового призначення малої потужності (приблизно до $1...4$ кВт у залежності від кількості пар полюсів) при симетричному трифазному живленні в діапазоні зміни навантаження $20...120\%$ від номінального.

Метою даної роботи є розробка системи керування трифазно-однофазного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем з дискретним регулюванням ємностей конденсаторів, що враховувала б стохастичний характер зміни навантаження

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Пропонується схема трифазно-однофазного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем (рис. 1) з дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів, при застосуванні якої ККД АД у діапазоні $20...120\%$ від номінального навантаження не знижується більше ніж на 3% від ККД того ж АД при симетричному навантаженні, а в трьох точках режиму роботи АД є повністю симетричним.

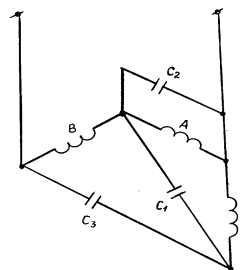


Рисунок 1 – Схема трифазно-однофазного ЕП з триелементним фазозміщуючим модулем

Узагалі симетричний режим у запропонованій схемі можна забезпечити при будь-якому навантаженні, що відповідає коефіцієнтам потужностей у вказаному діапазоні. Але для цього ємності всіх трьох фазозсуваючих конденсаторів повинні неперервно змінюватись за нелінійним законом. Тому через складність технічної реалізації неперервного регулювання ємностей конденсаторів доцільно обмежитись дискретним регулюванням з декількома ступенями регулювання ємностей.

На рис. 2 приведені залежності ККД двигуна від момента при його включенні за схемою (рис. 1) при триступеневому керуванні ємністю симетруючих конденсаторів, в якій у кожному з трьох діапазонів зміни навантаження існує точка зрівноваженого режиму. Режим низького навантаження відповідає навантаженню від 0 до 58 %. Це нижній ступінь багатоелементного фазозміщуючого модуля з дискретним триступеневим регулюванням ємностей його плечей. Режим середнього навантаження відповідає навантаженню від 50 до 88 %, тобто середній ступінь фазозміщуючого модуля. Режим великого навантаження відповідає навантаженню вище 80 %. Це режим верхнього ступеня фазозміщуючого модуля. З метою недопущення неоднозначності при керуванні схемою включення на межах режимів вибрана зона гістерезиса шириною 8 % від номінального навантаження.

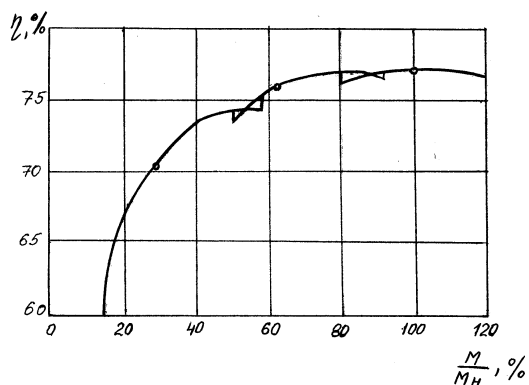


Рисунок 2 – Залежність ККД від навантаження

Значення оптимальних величин ємностей визначались методом математичного моделювання та підбором параметрів фазозсуваючих конденсаторів, що забезпечують симетричний режим. Табл. 1 показує залежність ємностей конденсаторів C1, C2, C3, що забезпечують симетричний режим, від коефіцієнту потужності для двигуна 4A71A2. З табл. 1 видно, що при коефіцієнті навантаження $\cos\phi=0,5$ (мале навантаження $\frac{M}{M_n}=25\%$) ця схема вироджується в схему Штейнметца, тобто $C2=0$ і $C3=0$.

При коефіцієнті навантаження $\cos\phi=0,5$ (схема Штейнметца) струм через конденсатор C1 відстає від напруги на обмотці С на 60 ел.град. Умовою вибору оптимальних ємностей при інших коефіцієнтах потужності залишається забезпечення фазового зсуву між струмом через конденсатор

C1 та напругою на обмотці С 60 ел.град. Дослідження показали, що при виконанні цієї умови струм через конденсатор C2 буде відставати від напруги на обмотці С на 30 ел.град.

Таблиця 1 – Значення оптимальних ємностей фазозсуваючих конденсаторів

$\frac{M}{M_n}, \%$	25	62	100
$\cos\phi, \text{ в.о.}$	0,5	0,78	0,87
C1, мкФ	24	49	63
C2, кФ	0	26	36
C3, кФ	0	18	24

Розглянута схема трифазно-однофазного електроприводу забезпечує симетричний режим при трьох значеннях навантаження: при 100, при 62 та при 25 %. При цих значеннях навантаження двигун має такі ж самі характеристики, що й при трифазному симетричному включенні. При всіх інших навантаженнях має місце несиметричний режим з додатковими втратами від струмів зворотної послідовності. Зменшення ККД за рахунок втрат від струмів зворотної послідовності не перевищує 3 %. Найбільш суттєво втрати від струмів зворотної послідовності виражені при 50 % навантаження.

Перемикання ступенів відбувається за допомогою керуючого пристрою, що включає в себе датчики тих фазних напруг і струмів, що є найбільш чутливими до зміни навантаження, мікропроцесорний пристрій, що визначає за показами датчиків необхідний ступінь фазозсуваючого модуля, та напівпровідникових комутаторів.

Важливою задачею для побудови керуючого пристрою є визначення параметрів, що є найбільш чутливими до зміни навантаження і які можуть бути використані в каналі зворотного зв'язку системи дискретного регулювання ємностями фазозсуваючих конденсаторів. Попередньо виберемо такими параметрами фазні напруги та струми. Оцінимо якість можливих вимірюючих елементів керуючого пристрою за чутливістю, що визначається за формулами:

$K = \frac{\Delta U}{\Delta M}$ – для датчиків напруги і $K = \frac{\Delta I}{\Delta M}$ – для датчиків струму. $\Delta U, \Delta I, \Delta M$ – відносні зміни фазної напруги, фазного струму та моменту навантаження в області поблизу точки, що досліджується. Чутливість будемо визначати для трьох значень навантаження: 25, 62 та 100 % (табл. 2).

Табл. 2 показує чутливість змін фазних напруг та струмів двигуна, що включений за схемою рис. 1 до зміни навантаження. Видно, що напруга фази В залишається приблизно постійною при зміні навантаження. Напруга фази А змінюється обернено пропорційно зміні навантаження, причому ця зміна складає приблизно 20 % в усьому діапазоні зміни навантаження. Напруга фази С також змінюється обернено пропорційно до зміни навантаження, але ця зміна

складає 30 %. Струм фази В є найбільш чутливим до зміни навантаження, причому змінюється цей струм рівномірно в усьому діапазоні зміни навантаження. Струм фази А також суттєво змінюється при великому навантаженні, але залишається практично постійним при малих навантаженнях. Струм фази С змінюється рівномірно обернено пропорційно зміні навантаження, але ця зміна є досить малою, і, відповідно, при контролі струму фази С система буде мати малу чутливість до зміни навантаження.

Таблиця 2 – Чутливість датчиків фазних струмів та напруг

$\frac{M}{M_n}, \%$	25	62	100
K_{U_A}	-0,28	-0,16	-0,10
K_{U_B}	0	0,02	0,02
K_{U_C}	-0,45	-0,21	-0,10
K_{I_A}	1,75	1,53	0,29
K_{I_B}	1,75	1,03	0,79
K_{I_C}	-0,23	-0,15	-0,14

Тому вхідними параметрами для керуючого пристрою доцільно використовувати напругу фази С і струм фази В, причому чутливість датчика напруги фази С відносно зміни навантаження є негативною за знаком (через обернено пропорційну залежність напруги фази С від навантаження), а чутливість датчика струму фази В відносно зміни навантаження є позитивною за знаком (через прямо пропорційну залежність струму фази В від навантаження). Тому буде доцільно контролювати процеси перемикання ступеней по напрузі фази С при зміні навантаження в напрямку зменшення і по струму фази В при зміні навантаження в напрямку збільшення.

Кожен з трьох ступенів призначений для роботи в деякому діапазоні зміни навантаження. Точка симетричного режиму знаходиться в середині цих діапазонів. На межах діапазонів, що відповідають одній ступені, двигун працює в несиметричному режимі.

Значення моментів навантаження, при яких відбувається перемикання ступеней для триступеневої схеми, визначаються максимально допустимими значеннями напруги фази В та струму фази С, що мають найбільш суттєвий характер залежності від моменту при постійному значенні ємностей (на одній ступені).

Виберемо лімітуючими факторами для роботи на одному ступеню десятивідсоткове перевищення струму фази В і напруги фази С. Це можливо, оскільки характер зміни напруг та струмів в інших фазах має інший характер, і вони, як показали розрахунки, при вказаних лімітуючих значеннях напруги фази С та струму фази В є меншими за номінальні, тож сумарні втрати не перевищують допустимі.

Так, при роботі на верхньому ступені при 80 % навантаження напруга фази С стає більшою, ніж 110 % від номінальної фазної напруги. Тому це значення навантаження (80 %) обираємо як точку пере-

микання з верхнього ступеня на середній ступінь, щоб обмежити напругу фази С рівнем 110 %.

При роботі на середній ступені при зниженні навантаження до 50 % напруга фази С знову стає рівною 110 % від номінальної. Тому вибір цього навантаження (50 %) як точки перемикання із середньої ступені на нижню ступінь теж обмежує напругу фази С при роботі на середній ступені на рівні 110 % від номінальної.

При роботі на середньому ступені при збільшенні навантаження до 88 % від номінального струм фази В стає більшим, ніж 110 %. Тому вибір цього навантаження (88 %) як точки перемикання із середнього ступеня на верхній ступінь дозволяє обмежити струм фази В при роботі на середньому ступені на рівні 110 %. Таким чином, гістерезис при перемиканні з верхнього на нижній ступінь і навпаки складає 8 % (88 %–80 %) від номінального навантаження, що дозволяє уникнути неоднозначності визначення необхідного ступеня конденсаторів при роботі поблизу точки 80 % навантаження та забезпечує надійне перемикання керуючих реле без брязкоту контактів.

При роботі на нижньому ступені струм фази В стає рівним 110 % від номінального фазного струму при збільшенні навантаження до 63 %. При виборі цього струму (63 %) як точки перемикання з нижнього ступеня на середній гістерезис при перемиканні «нижній ступінь – середній ступінь» складатиме 13 % (63 %–50 %). Але з точки зору спрощення системи керування більш доцільним було б залишити такий же гістерезис 8 %, як і при перемиканні «середній ступінь – верхній ступінь». Тому перемикання з нижнього ступеня на середній ступінь слід забезпечити при збільшенні навантаження до 58 % (50 %+8 %) від номінального. Струм фази В при цьому навантаженні складатиме 104 % від номінального фазного струму.

Запропонована замкнута система керування може забезпечити симетричний режим роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни навантаження і, відповідно, знизити його енергоспоживання та підвищити надійність його роботи. Але оскільки розглядаються режими навантаження електроприводів, що мають різко змінний характер, система керування через наявність електромагнітної та механічної інерційності в замкнутому контурі не дозволяє отримати оптимальний режим без відповідної фільтрації випадкової складової навантаження. Отже, керуючий мікропроцесорний пристрій для врахування стохастичного характеру зміни навантаження повинен бути доповнений фільтром випадкової величини.

Для аналізу та синтезу електроприводів за зовнішнім збуренням – моментом опору робочої машини – розроблена методика моделювання навантажень, що мають стохастичний характер. Розкладення реалізацій моментів опору електроприводів даного класу за гармонічними складовими, дослідження їх кореляційних функцій показало, що їм властиві стаціонарність та ергодичність, та дозволило провести їх класифікацію. За кореляційними функціями та спектральними густинами види стохастичних навантажень можуть бути розділені на чотири класи:

– постійний спектр:

$$R(\tau) = N\delta(\tau); \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{N}{2\pi}, \quad (2)$$

– експоненціальний спектр:

$$R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|}; \quad (3)$$

$$S(\omega) = \frac{D\alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)}, \quad (4)$$

– експоненціально-косинусний спектр;

$$R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau; \quad (5)$$

$$S(\omega) = \frac{D}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \beta)^2} \right], \quad (6)$$

– сума експоненціально-косинусних спектрів.

У формулах (1)–(6) N – інтенсивність білого шуму, $\delta(\tau)$ – функція Дірака, D – дисперсія випадкового процесу зміни навантаження.

Така класифікація дозволяє формалізувати задачі аналізу та синтезу режимів роботи електроприводів і вибору їх параметрів.

Сумісна модель електроприводу та навантаження дозволяє визначити структуру системи керування трифазно-однофазних електроприводів в умовах дії стохастичних збурень з метою мінімізації струмів зворотної послідовності.

Для розробки алгоритму оптимальної фільтрації використаний критерій мінімуму середньоквадратичної похибки відтворення корисного сигналу. Тоді частотна передаточна функція фільтру визначається за формулою:

$$W(j\omega) = \frac{1}{\Psi(j\omega)} \left[\frac{S(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right]^+, \quad (7)$$

де $S(\omega) = \Psi(j\omega)\Psi(-j\omega)$ – спектральна густина навантаження, $\left[\frac{S(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right]^+$ – частина передаточної функції

цієї фільтру, що має полюси та нулі в правій напівплощині комплексної змінної $j\omega$ і може бути фізично реалізована з точки зору стійкої роботи фільтру.

Розрахунки показали, що при навантаженні, яке має експоненціальний спектр, передаточною функцією оптимального фільтру буде інерційна ланка, а при навантаженні з експоненціально-косинусним спектром – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки.

Технічна реалізація фільтру може бути здійснена як аналоговими, так і цифровими засобами. З точки зору мінімізації габаритних показників і універсальності більш перспективним є синтез цифрового фільтру за допомогою математичного апарату Z-перетворення передаточних функцій фільтру та визначення відповідного алгоритму фільтрації у вигляді різницевого рівнянь.

ВИСНОВКИ. Запропонована схема трифазно-однофазного ЕП з триелементним фазозміщуючим модулем дозволяє отримати в однофазному режимі ККД АД у діапазоні 10–100 % від номінального навантаження не менше ніж на 3 % від ККД того ж АД при симетричному живленні. Використання алгоритму оптимальної фільтрації в замкнутих системах таких електроприводів дозволяє забезпечити мінімальну дисперсію коефіцієнту несиметрії при зміні навантаження в широкому діапазоні за випадковими законами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Адаменко А.И. Методы исследования несимметричных асинхронных машин. – К.: Наукова думка, 1969. – 356 с.
2. Шуруб Ю.В. Оптимізація трифазно-однофазних асинхронних електроприводів з ємнісними багатоелементними фазозміщуючими модулями змінної структури // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 39–40.

WORKING OUT OF SYSTEM OF CONTROL OF THREE-ONE PHASE INDUCTOIN ELECTRIC DRIVES AT RANDOM LOADS

Yu. Shurub

Institute of Electrodynamics of NAS, Ukraine

prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail:shurub@bigmir.net

The system of control of the three-one phase induction electric drive with the three-element phase-shifting module is offered, allowing to gain a symmetric regime in a wide range of change of random loads. A method for simulation of loads that are stochastic in nature. Determined the optimal filter transfer function is controlled by a microprocessor device with loads of different spectra.

Key words: induction electric drive, phase-shifting module, random load.

REFERENCES

1. Adamenko A.I. *Methods for studying asymmetric induction machines.* – K.: Naukova Dumka, 1969. – 356 p. [in Russian]
2. Shurub Y.V. Optimization of single-phase asynchronous motors with their multi-yemnis fazozmischuyuchymy fashion-lyamy variable structure // *Pr. The Institute of Electrodynamics Academy of Sciences of Ukraine: Zb. nauk. pr.* – K.: NASU IER, 2008. – Iss. 20. – PP. 39–40. [in Ukraine]

Стаття надійшла 20.01.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.