

УДК 621.314.27

Плахтина О.Г., Боднар Г.Й., Куцик А.С., Плахтина І.О.
 ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З КАСКАДНИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ

© Плахтина О.Г., Боднар Г.Й., Куцик А.С., Плахтина І.О., 2000

У статті описано спосіб покращання форми вихідної напруги перетворювача частоти компенсацією вищих гармонік у її складі та схему електропривода з використанням перетворювача частоти “випрямляч – каскадний інвертор” і асинхронного короткозамкненого двигуна. Розроблена математична модель такої системи. Досліджені електромагнітні та електромеханічні процеси у запропонованій системі електропривода методами математичного моделювання.

Аналіз сучасного стану і тенденції розвитку частотного керування асинхронними двигунами (АД) показує, що поряд з найсучаснішими і найскладнішими системами керування, такими як векторне чи пряме керування моментом, прослідковується інтерес до скалярних систем частотного керування. Такі системи доцільно використовувати в електроприводах, де не ставляться високі вимоги до статичних та динамічних характеристик, наприклад, в електроприводах турбомеханізмів.

Сьогодні багато фірм у світі випускають перетворювачі частоти (ПЧ) для регулювання швидкості АД за схемою “випрямляч – автономний інвертор напруги (АІН)” з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), використовуючи скалярні системи керування. Перетворювачі з АІН з ШІМ є складними, в експлуатації створюють деякі технічні проблеми (зменшують довговічність ізоляції АД і є джерелом завад), і не завжди за умов електромагнітної сумісності, їх можна використати в електроприводах турбомеханізмів. Тому для таких механізмів нами запропоновано системи електропривода з використанням ПЧ, виконаних за схемою «керований випрямляч – каскадний інвертор напруги» (КВ – КІН), блок схеми яких показані на рис.1, 2. На рисунках позначено: 1 – комутаційна

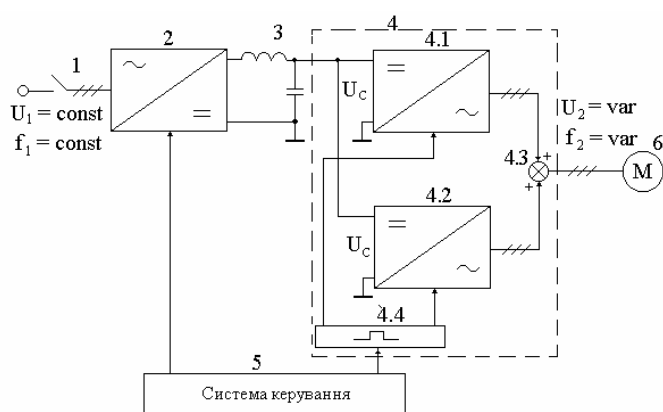


Рис.1. Схема електропривода з КІН (2 АІН).

апаратура, 2 – керований випрямляч, 3 – згладжувальний фільтр, 4 – каскадний інвертор напруги, 5 – система керування, 6 – асинхронний двигун.

зменшують довговічність ізоляції АД і є джерелом завад), і не завжди за умов електромагнітної сумісності, їх можна використати в електроприводах турбомеханізмів. Тому для таких механізмів нами запропоновано системи електропривода з використанням ПЧ, виконаних за схемою «керований випрямляч – каскадний інвертор напруги» (КВ – КІН), блок схеми яких показані на рис.1, 2. На рисунках позначено: 1 – комутаційна

Основним елементом КІН є АІН з тривалістю провідного стану вентилів $\lambda = \pi$. Відомо, що на виході АІН з $\lambda = \pi$ напруги мають ступінчасту форму і описуються такими виразами:

$$U_1 = U_c \cdot \sum_{j=1}^{n+1} \left(\frac{2}{j\pi} \right) \sin j(\gamma),$$

$$U_2 = U_c \cdot \sum_{j=1}^{n+1} \left(\frac{2}{j\pi} \right) \sin j(\gamma - \rho),$$

$$U_3 = U_c \cdot \sum_{j=1}^{n+1} \left(\frac{2}{j\pi} \right) \sin j(\gamma - 2 \cdot \rho),$$

де U_1, U_2, U_3 – фазні напруги на виході АІН; U_c – постійна напруга на вході АІН; $j = 6k \pm 1$, де $k = 0, 1, 2, \dots, n/6$ – порядковий номер гармоніки ($j = 1, 5, 7, 11, 13, \dots, n+1$); $\rho = 2\pi/3$; $\gamma = \omega t$, де ω – частота основної гармоніки; t – біжуче значення часу.

З'єднання АІН в КІН дає змогу компенсувати вищі гармоніки у складі напруг на виході ПЧ, і у випадку використання в електроприводах високовольтних двигунів, узгодити напруги живлення АД, оскільки елементами додавання напруг в схемі КІН 4.3 (рис.1, 2) є трансформатори. Тому ПЧ з КІН можна рекомендувати для використання в електроприводах турбомеханізмів з високовольтними АД (6 кВ і більше) для ефективного регулювання їх продуктивності. При цьому не вимагається, у випадку модернізації, заміни серійних привідних АД на двигуни спеціального виконання. Крім того використання в електроприводі ПЧ з КІН дає змогу покращити енергетичні показники ПЧ, що проявляється в збільшенні коефіцієнта потужності керованого випрямляча (джерела живлення КІН) за рахунок зменшення споживання реактивної потужності каскадним інвертором, оскільки КІН забезпечує взаємокомпенсацію реактивної потужності. Отже, використання в перетворювачі частоти КІН дає змогу одержати на виході ПЧ напруги не лише близькі за формою до синусоїди, а і значно розвантажити за реактивною потужністю КВ та елементи схеми призначенні для її циркуляції.

В електроприводі, схема якого показана на рис.1, АД живиться напругою, яка не має в своєму складі 5-ї і 7-ї та всіх інших гармонік з ряду $j = 6m \pm 1$, де m – непарні числа, та гармонік кратних трьом. Тому в усталеному режимі роботи електропривода пульсації електромагнітного моменту АД невеликі, і, згідно з одержаними результатами математичного моделювання, не перевищують 4 %. Оскільки в такому разі у складі напруг живлення АД найближчими гармоніками залишаються 11-та і 13-та гармоніки, тому частота пульсацій моменту в 12 разів більша від частоти вихідної напруги ПЧ (рис.3,б).

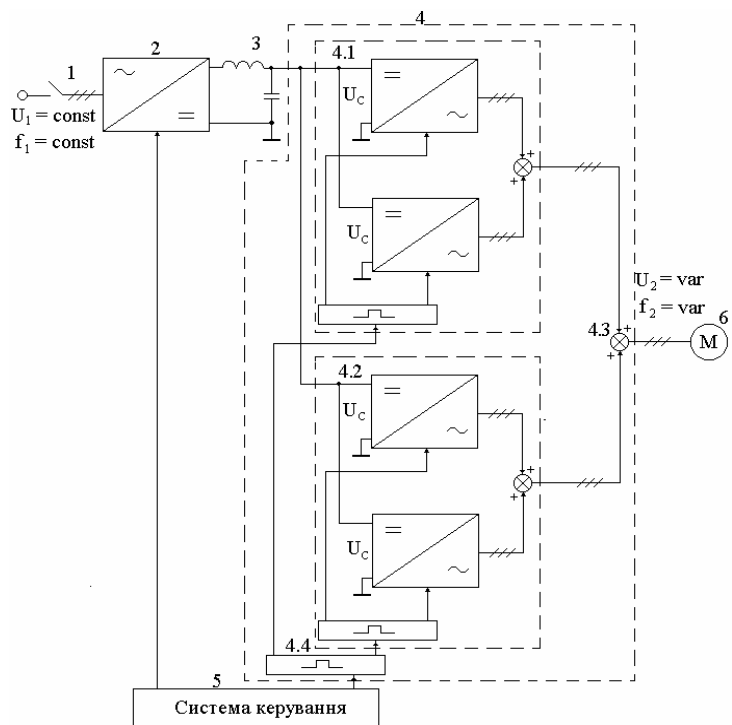


Рис.2. Схема електропривода з КІН (4 АІН).

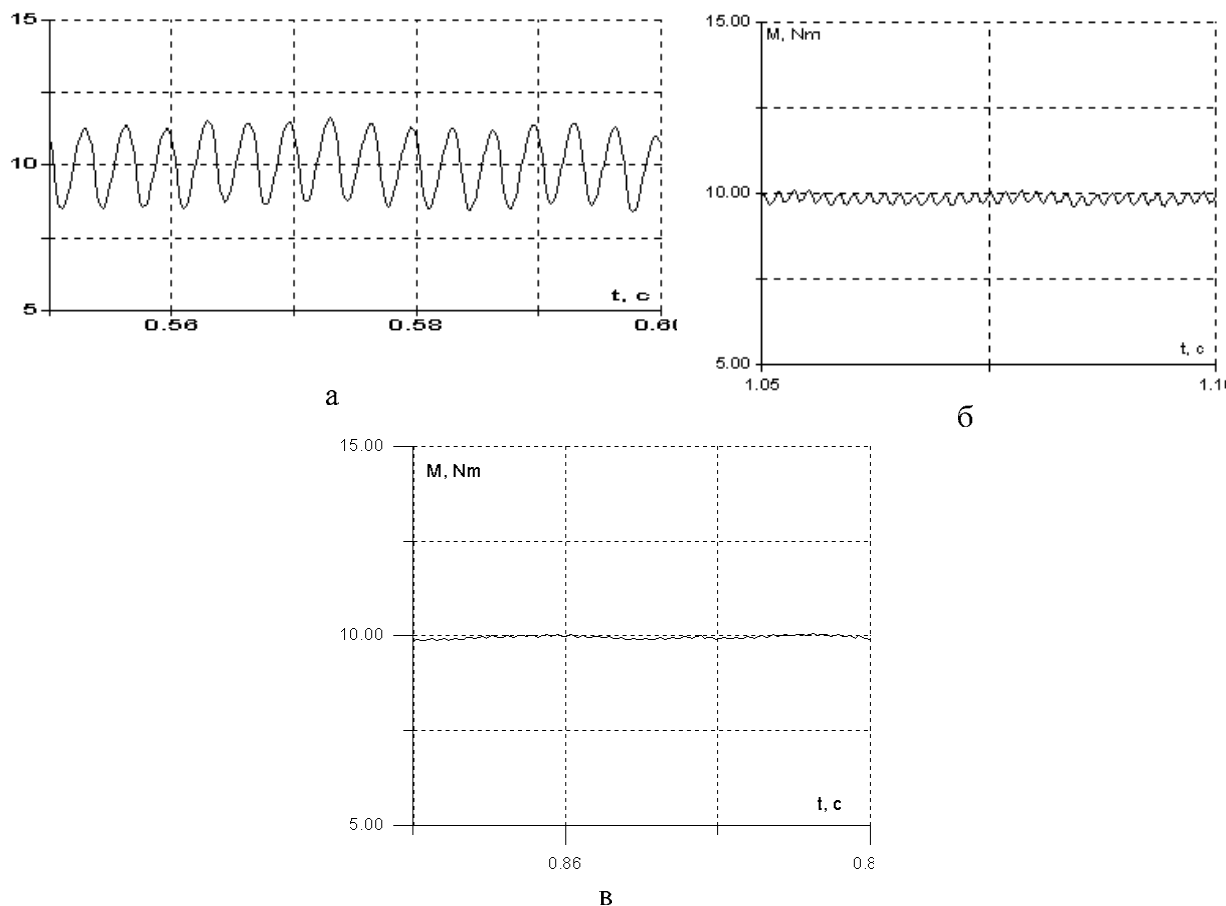


Рис.3. Електромагнітний момент асинхронного двигуна у випадку:

- а – живлення від шеститактного АІН; б – живлення від каскадного інвертора (2 АІН, рис.1);
 в – живлення від каскадного інвертора (4 АІН, рис.1)

В електроприводі, схема якого показана на рис.2, АД живиться практично синусоїдною напругою, оскільки з вищих гармонік у її складі є 23-тя і 25-та гармоніки. Пульсації електромагнітного моменту АД незначні (рис.3,в) і не впливають на роботу електропривода, оскільки амплітуда цих гармонік є малою.

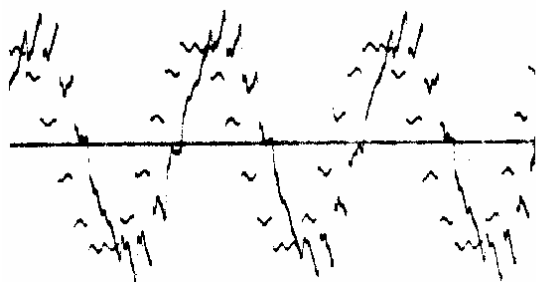


Рис.4. Осцилограма фазної напруги і струму АД.

Дослідження електромагнітних та електро-механічних процесів в описаних системах електропривода проводились методами математичного моделювання, а також експериментально на реальній установці. На рис.4 показано зняті експериментально на діючій лабораторній установці осцилограми фазної напруги та струму АД в електроприводі за схемою рис.1.

При створенні математичних моделей систем електропривода було використано теорію математичного моделювання електромашинно-вентильних систем з напівпровідниковими перетворювачами [1]. Відповідно до обраного підходу математична модель системи формується з математичних моделей її структурних елементів (мережі, випрямляча, каскадного інвертора, трансформаторів, асинхронної машини) і є замкненою системою

диференційних рівнянь, яка складається з рівнянь, що описують структурні елементи системи, рівнянь, для визначення потенціалів вузлів системи – точок з'єднання елементів між собою, та рівнянь, які описують роботу системи керування електроприводом.

Математична модель випрямляча та інверторів формувалась з моделей катодної та анодної вентильних груп.

Під час створення математичної моделі вентильних груп зроблено такі допущення: вентилялі (тиристори) моделювались ланкою з послідовно – з'єднаних активного та індуктивного опорів, які набувають малих значень при відкритому стані вентиля і великих – при закритому стані; тиристори випрямляча відкриваються у випадку одночасного виконання таких умов:

- *ε* дозвіл на відкривання тиристора за кутом α : $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \Delta\alpha$;
- напруга на тиристорі додатна;
- тиристор був у закритому стані.

Закривання тиристора випрямляча здійснюється в момент переходу струму тиристора через нуль з додатного у від'ємне значення. Вентилі інвертора знаходяться у відкритому стані лише в межах інтервалу, який визначається алгоритмом роботи для шеститактного інвертора з $\lambda=\pi$.

Математичні моделі елементів систем електропривода з КІН (вентильні групи, трансформатори, асинхронна машина) описані в [2, 3].

Результати досліджень електромагнітних та електромеханічних процесів у системах електропривода (рис.1, 2) з каскадним інвертором напруги показані на рис.3; 5–10.

На рис.5, 6 показано розраховані часові залежності фазної напруги і струму на виході перетворювача частоти "випрямляч-інвертор" з тривалістю провідного стану вентилів АІН $\lambda=\pi$. На рис.7 та 8 показано розраховані часові залежності фазної напруги і струму на виході перетворювача частоти з КІН (каскадне включення двох інверторів, рис.1), у випадку роботи ПЧ на асинхронний двигун. На рис.9, 10 зображені розраховані часові залежності фазної напруги і струму на виході перетворювача частоти з КІН (каскадне включення чотирьох інверторів, рис.2), у випадку роботи ПЧ на асинхронний двигун. На рис.3 показано обчислений електромагнітний момент асинхронного двигуна у випадку живлення

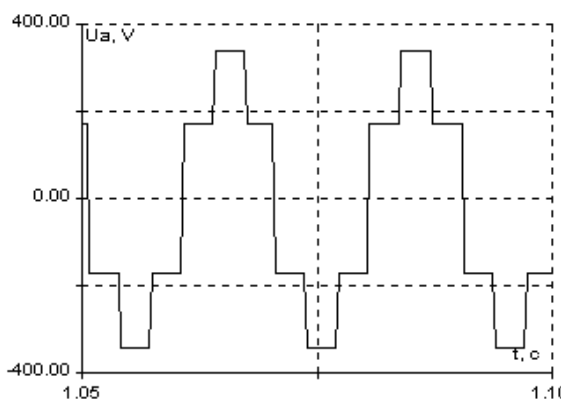


Рис.5. Фазна напруга на виході шеститактного інвертора

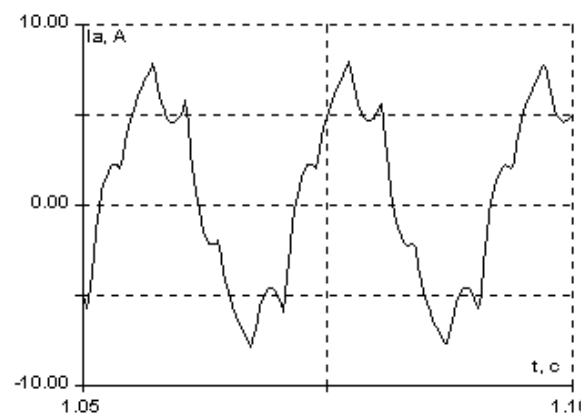


Рис.6. Струм статора АД у випадку живлення від шеститактного інвертора

його від традиційного перетворювача частоти (рис.3,а), від ПЧ з КІН з двома АІН, відповідно до рис.1 (рис.3,б) та), від ПЧ з КІН з чотирма АІН, відповідно до рис.2 (рис.3,в).

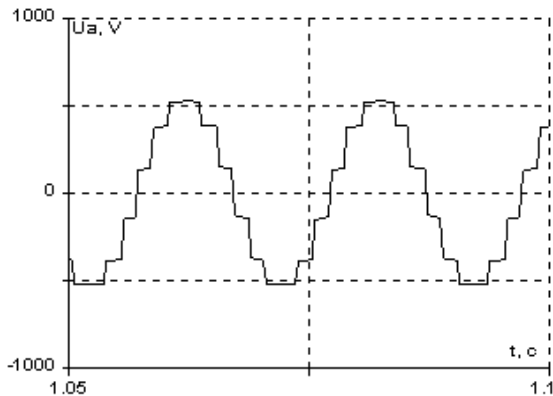


Рис.7. Фазна напруга на виході каскадного інвертора (2 АІН).

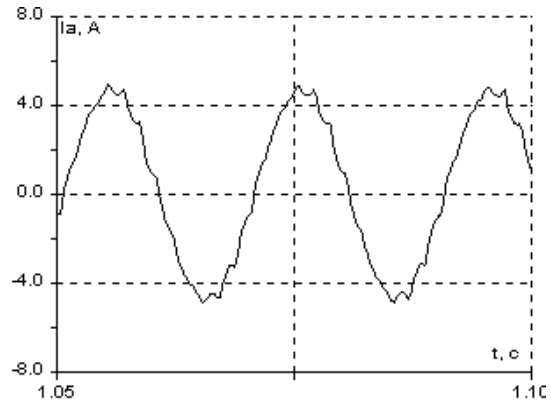


Рис.8. Струм статора АД у випадку живлення від каскадного інвертора (2 АІН).



Рис.9. Фазна напруга на виході каскадного інвертора (4 АІН).

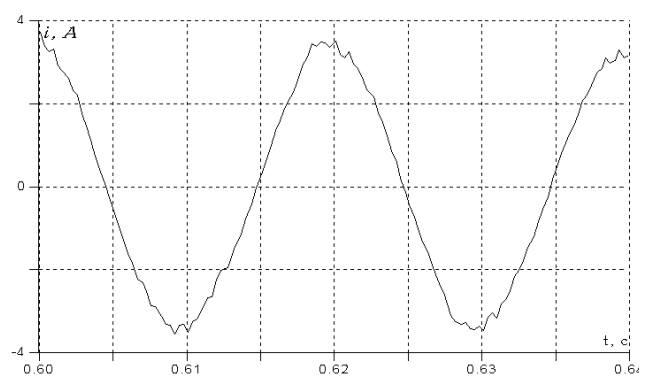


Рис.10. Струм статора АД у випадку живлення від каскадного інвертора (4 АІН).

Як видно з отриманих залежностей, із збільшенням кількості АІН у схемі КІН суттєво покращується форма вихідної напруги перетворювача частоти (у схемі КІН відбувається компенсація вищих гармонік), і тим самим покращується форма струму АД, що призводить до зменшення пульсацій електромагнітного моменту асинхронного двигуна, які в електроприводі є небажаними, оскільки можуть спричинити резонансні явища і зупинення двигуна на малих швидкостях.

1. Плахтина Е.Г. Математическое моделирование электромашино – вентиляционных систем. Львов, 1986. 2. Плахтина О.Г., Боднар Г.Й., Куцук А.С. Математичне моделювання перетворювача частоти з каскадним включенням інверторів // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 1998. № 340. С.91–96. 3. Plakhtyna O., Bodnar G., Kutsyk A., Plakhtyna I., Cie-slik S. Electric drive by the scheme “Rectifier – cascade inverter – induction motor” // Proceeding of 3-th International Symposium on Advantages Electromechanical motion systems, Patras, Greece, 1999. P.303–307.