

Ю. В. Шабатура, Я. С. Паранчук, В. О. Чумакевич

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТРИФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ З ПОКРАЩЕНОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЮ СУМІСНІСТЮ

Стаття присвячена розробці енергозберігаючої системи управління трифазними електроприводами військово-технічних комплексів, яка відрізняється покращеною електромагнітною сумісністю.

Актуальність дослідження. Однією з найосновніших вимог, які висуваються до електроприводів, що використовуються в озброєнні та військово-технічних комплексах, є надійність, поєднана з економічністю. Хороші електромеханічні характеристики, висока надійність, що забезпечує здатність працювати у важких умовах, зумовлюють широке застосування синхронних і асинхронних трифазних електроприводів в озброєнні та військово-технічних комплексах. Разом з тим необхідно зазначити, що робота таких електроприводів від автономних і, як правило, обмежених у потужності джерел електроживлення часто супроводжується ударними або значною мірою нелінійними змінами механічних навантажень. Це спричиняє спотворення форми струму в обмотках статорів електродвигунів і, відповідно, призводить до порушення оптимального процесу перетворення електричної енергії в механічну енергію обертального руху, а також до погіршення електромагнітної сумісності з радіоелектронними пристроями і системами за рахунок зростання рівня електромагнітних завад. Тому актуальним у науковому відношенні й важливим для практики є вирішення завдання створення і дослідження такої системи управління трифазними електродвигунами, яка забезпечить збереження синусоїдної форми струму в їх статорних обмотках за умови дії динамічних навантажень на валу їх роторів. Високий рівень розвитку силової напівпровідникової електроніки й мікропроцесорної техніки дає змогу на сучасному етапі успішно розв'язувати складні задачі в галузі автоматизованих електроприводів. Особливого значення і підвищеної складності набуває вищесформульоване завдання для складних військово-технічних комплексів, насичених інтегрованими електронними системами й оснащених значною кількістю трифазних електроприводів, які внаслідок дії динамічних навантажень мають нелінійні характеристики енергоспоживання. Для його успішного вирішення необхідно виконати розробку та провести дослідження системи магнітно-тиристорного перетворення напруги (МТПН) для керування трифазними електроприводами з дотриманням вимог енергозбереження та електромагнітної сумісності.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Таким чином, необхідно розробити функціональну схему системи МТПН для керування трифазними асинхронними двигунами (АД) та побудувати її математичну модель. Крім того, слід виконати комп'ютерне моделювання запропонованої системи з метою визначення її можливостей у забезпеченні збереження синусоїдної форми струму в обмотках статора.

Для отримання кількісної оцінки про рівень спотворення синусоїдної форми струмів у процесі їх тиристорного регулювання у системі „магнітно-тиристорний перетворювач

напруги – асинхронний двигун” (МТПН–АД) потрібно провести дослідження гармонічного складу струмів статора асинхронного двигуна у цій системі.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [1–4] свідчить, що сьогодні найбільш оптимальним щодо достовірності результатів і витрат на їх отримання є математичне моделювання процесів зміни усереднених координат системи електроприводу МТПН–АД у процесі їх тиристорного регулювання, яке виконується на комп’ютері за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього необхідно розробити цифрову модель системи МТПН–АД і для порівняння класичної системи тиристорного перетворювача напруги з функціональною можливістю таких моделей виконувати на їх основі гармонічний аналіз струмів та напруг.

У сучасних автоматизованих асинхронних електроприводах військово-технічних комплексів вимагається регулювання швидкості й реалізація плавного пуску (Soft-Start). Для цього найчастіше використовується система „тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун” (ТПН–АД) [2]. Однак потрібно зазначити, що в процесі роботи такої системи погіршується синусоїдність струмів і напруг та енергетичні показники асинхронного двигуна. Зазначена проблема загострюється при зростанні кількості та одиничної потужності таких електроприводів у вузлі навантаження і відносно слабкій мережі автономних систем живлення військово-технічних комплексів.

Для покращення зазначених показників у роботі [3] запропоновано будувати систему управління асинхронних електроприводів за схемою МТПН–АД.

Метою статті є доведення можливості застосування МТПН для управління асинхронними електроприводами військово-технічних комплексів, що приводить до зменшення спотворення синусоїдності струмів та напруг в обмотках їх статорів, внаслідок чого зменшуються додаткові втрати в АД, які спричинені вищими гармоніками, а також покращуються умови електромагнітної сумісності.

Виклад основного матеріалу. В основі будови МТПН лежить використання у фазних гілках живлення АД послідовно з’єднаних дросельних індуктивностей, моменти комутації яких регулюються за допомогою паралельно увімкнених тиристорів.

Схема силового кола МТБН у варіанті з однією паралельною тиристорною групою (ТРГ) у кожній фазній гілці зображена на рис. 1.

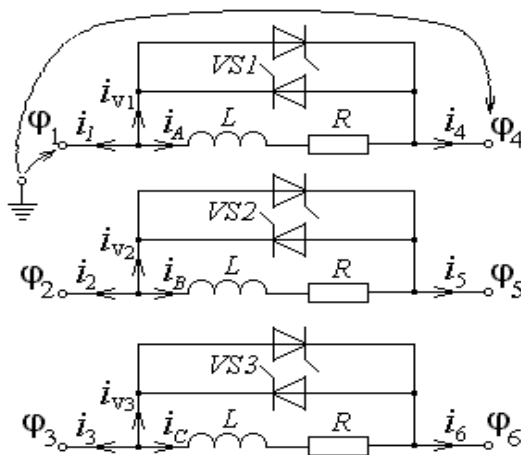


Рис. 1. Схема силового кола магнітно-тиристорного перетворювача напруги

Математичну модель МТПН як окремого елемента системи автоматичного керування (САК) режимами АД побудуємо на основі підходів до моделювання електромашиновентильних систем, які розглянуті в [2].

Для цього математичну модель МТПН як структурного елемента асинхронного електроприводу подамо у вигляді зовнішнього векторно-матричного рівняння (1) та внутрішніх рівнянь вигляду (2), що описують його електричну схему:

$$p\vec{i} + G \cdot \vec{\varphi} + \vec{C} = 0; \quad (1)$$

$$p\vec{y}_1 = f_1(\vec{i}, p\vec{i}, \vec{y}_1); \quad \vec{y}_2 = f_2(\vec{i}, p\vec{i}, \vec{y}_1), \quad (2)$$

де G, \vec{C} – матриця розмірності (6×6) і 6-елементний вектор-стовпець, компоненти яких визначаються параметрами МТПН;

$\vec{i}, p\vec{i}, \vec{\varphi}$ – вектори струмів, похідних струмів зовнішніх гілок та потенціалів зовнішніх вузлів МТПН відповідно;

$\vec{y}_1, p\vec{y}_1$ – вектори решти змінних МТПН та їх похідних, які не входять у вектор \vec{i} відповідно;

\vec{y}_2 – вектор змінних, які не мають у системі рівнянь похідних (крім потенціалів зовнішніх вузлів МТПН, які входять у вектор $\vec{\varphi}$).

Сукупність рівнянь (1) та (2) визначає у загальному випадку універсальну математичну модель МТПН як структурного елемента досліджуваної системи асинхронного електроприводу.

Запишемо рівняння балансу напруг для кожної фазної гілки МТПН (паралельної тиристорно-дросельної групи, рис. 1) та похідних струмів для кожного внутрішнього вузла схеми:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_4 - Lp i_A - R i_A &= 0; \\ \varphi_2 - \varphi_5 - Lp i_B - R i_B &= 0; \\ \varphi_3 - \varphi_6 - Lp i_C - R i_C &= 0; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} p i_1 + p i_A + p i_{v1} &= 0; \\ p i_2 + p i_B + p i_{v2} &= 0; \\ p i_3 + p i_C + p i_{v3} &= 0; \\ p i_4 - p i_A - p i_{v1} &= 0; \\ p i_5 - p i_B - p i_{v2} &= 0; \\ p i_6 - p i_C - p i_{v3} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Визначимо похідні струмів $p i_A, p i_B, p i_C$ з першої системи рівнянь (3) і підставимо їх вирази в другу. У результаті цього отримаємо систему рівнянь у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} p i_1 \\ p i_2 \\ p i_3 \\ p i_4 \\ p i_5 \\ p i_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L \\ -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R i_A / L \\ -R i_B / L \\ -R i_C / L \\ R i_A / L \\ R i_B / L \\ R i_C / L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p i_{v1} \\ p i_{v2} \\ p i_{v3} \end{bmatrix} = 0.$$

Або з врахуванням поданих вище позначень матриць та векторів отримаємо таке векторно-матричне рівняння:

$$p\vec{i} + G\vec{\varphi} + \vec{C} + A p\vec{i}_v = 0, \quad (4)$$

де $\vec{i} = (i_1, i_2, \dots, i_6)^T$;

$\vec{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6)^T$ – вектор струмів зовнішніх гілок, що виходять з нього, та вектор потенціалів зовнішніх вузлів МТПН як точок можливого його під'єднання у схему досліджуваної системи асинхронного електроприводу;

$$G = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L \\ -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix}, \quad \vec{C} = \begin{bmatrix} -R_{i_A}/L & -R_{i_B}/L & -R_{i_C}/L & R_{i_A}/L & R_{i_B}/L & R_{i_C}/L \end{bmatrix}^T \text{ – матриця}$$

та вектор, елементи яких визначаються параметрами МТПН;

$\vec{i}_v = (i_{v1}, i_{v2}, i_{v3})^T$ – вектор струмів трифазного біполярного тиристорного ключа;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \text{ – матриця, що визначається внутрішньою схемою}$$

сполучення у фазних гілках біполярних тиристорних ключів та дроселів.

Рівняння (4) є зовнішнім векторно-матричним рівнянням МТПН, тому його можна використовувати для моделювання системи управління асинхронних електроприводів за схемою „МТПН–АД”.

Моделювання МТПН-АД. Функціональна схема запропонованої системи управління асинхронним електроприводом МТПН–АД зображена на рис. 2, де СІФК – система імпульсно-фазового керування. Механічні характеристики для замкненої системи з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором швидкості (РШ) для трьох рівнів стабілізації швидкості двигуна ($0.7\omega_n$, $0.4\omega_n$, $0.2\omega_n$) показані на рис. 3. Механічні характеристики розраховані для АД з фазним ротором типу 4АК160S4 з $P_n = 11 \text{ кВт}$, $n_n = 1435 \text{ об/хв}$.

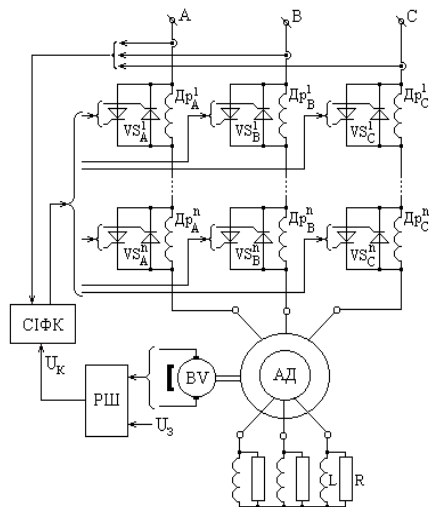


Рис. 2. Функціональна блок-схема системи МТПН–АД

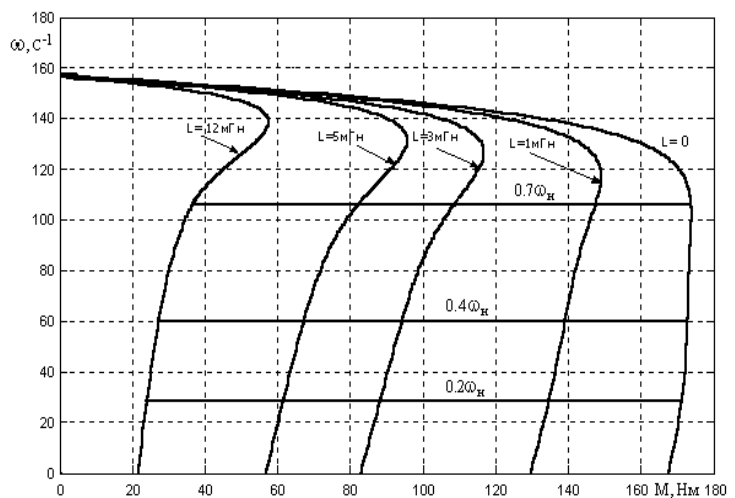


Рис. 3. Механічні характеристики системи МТПН–АД

Як видно з функціональної блок-схеми, особливістю розробленої системи МТПН-АД є те, що регулювання напруги на статорі АД виконується зміною моментів відкриття тиристорів VS_n , додатково включених і послідовно сполучених у кожній фазі тиристорно-реакторних груп (ПТРГ) ($n = 1, 2, 3\dots$). ПТРГ являє собою паралельне з'єднання пари зустрічно-паралельно увімкнених тиристорів VS і дроселя Др. Сумарна номінальна індуктивність дроселів ПТРГ визначається з умови отримання необхідного діапазону регулювання напруги на статорі АД. Для кута регулювання $\alpha = 0^\circ$ дросель відповідної ПТРГ буде зашунтований відкритим тиристором на кожному повному півперіоді, тому його еквівалентна індуктивність $L_{op} \cong 0$. Якщо $\alpha = 90^\circ$ – тиристори залишаються в закритому стані, отже, дросель матиме індуктивність, яка дорівнює номінальному її значенню $L_{op} \cong L_{op,n}$, а при $0 < \alpha < 90^\circ$ вона матиме проміжне значення $0 < L_{op} < L_{op,n}$. У кожен момент часу кут регулювання тиристорів однієї з ПТРГ $0 < \alpha < 90^\circ$, а для інших – $\alpha = 0$ чи $\alpha = 90^\circ$, тобто ПТРГ для них є лінійними елементами у колі статора АД.

Для проведення комп'ютерного моделювання створено модель системи МТПН-АД, яка реалізована в середовищі пакету MatLab+Simulink (на рис. 4). У ній використано модель АД з параметрами: $P_n = 11$ кВт; $U_{1л} = 380$ В; $f = 50$ Гц; $R_1 = 0.3732$ Ом; $L_1 = 2.127$ мГн; $R_2 = 0.5008$ Ом; $L_2 = 2.69$ мГн; $L_m = 60.4$ мГн; $J = 0.1$ кг·м²; $F = 0.00244$ Н·м/с; $p = 2$, трифазної RL-ланки в колі ротора ($R = 0.5$ Ом, $L = 2.5$ мГн), блоку створення заданого моменту статичного навантаження, задавача і давача швидкості АД і контролера. У контролері реалізовано ПІ-регулятор швидкості. На виході контролера формується сигнал керування $U_k = 0..10$ В, який поступає на вхід системи імпульсно-фазового керування МТПН. Імпульси керування тиристорами VS з відповідним кутом α формуються в СІФК за вертикальним принципом, а їх синхронізація виконується за фазою струму статора АД. Модель МТПН переналаштовується для роботи з однією або трьома сполученими послідовно у кожній фазі паралельними тиристорно-реакторними групами.

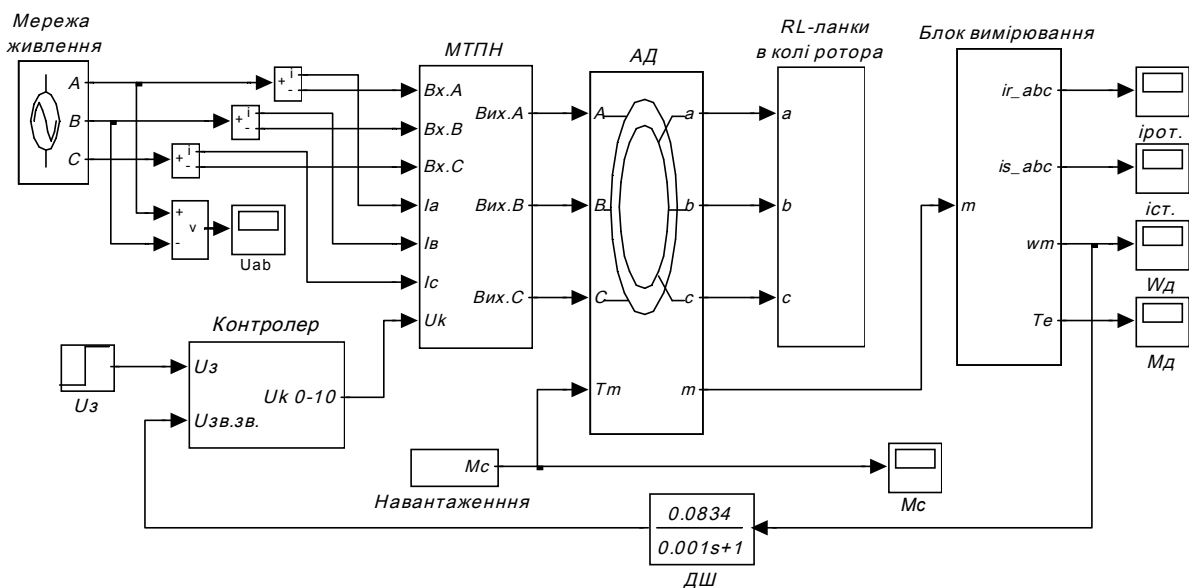


Рис. 4. Функціональна блок-схема моделі електроприводу МТПН-АД

Для порівняння ефективності роботи МТПН–АД у частині визначення фактичного рівня спотворення синусоїдності струмів статора АД було проведено моделювання класичної системи ТПН–АД для ідентичних параметрів двигуна, навантаження і живлення. Модель системи електроприводу ТПН–АД відрізняється від описаної моделі системи МТПН–АД лише включенням ТПН замість МТПН. Синхронізація імпульсів керування у цьому електроприводі виконується за фазою напруги мережі, а для врахування зміни коефіцієнта потужності зі зміною ковзання АД ширина імпульсів керування прийнята 72 ел.град. Силова частина ТПН і його СІФК зібрані на основі стандартних елементів бібліотеки Power System Blockset пакету MatLab+Simulink.

Гармонічний аналіз струмів статора АД при функціонуванні розробленої та відомої систем асинхронного електроприводу виконувався засобами пакету MatLab-6.5 шляхом опрацювання отриманих в математичних експериментах і записаних у робочу область пакету масиву струмів.

Інформація про гармонічний склад струмів статора АД отримувалася у процесі виконання математичного моделювання на створених моделях МТПН–АД і ТПН–АД в усталених режимах для трьох значень швидкостей ($0.2\omega_n$, $0.4\omega_n$ і $0.7\omega_n$) та зміні моменту двигуна в межах 40..100 Нм ($M_n = 80\text{Нм}$). Форма струму статора оцінювалася коефіцієнтом спотворення синусоїдності $K_c(M)$ та відносними значеннями амплітуд вищих гармонік струму $I_v(M)$, де $v = 2, 3, 4, \dots, 20$.

На рис. 5 показано отримані залежності коефіцієнта спотворення синусоїдності статора для трьох значень швидкості АД для схеми ТПН–АД та МТПН–АД при функціонуванні однієї та трьох паралельних тиристорно-реакторних груп. Аналіз наведених графіків показує фактичне зменшення коефіцієнта спотворення синусоїдності струмів при використанні у схемі МТПН–АД трьох паралельних тиристорно-реакторних груп у порівнянні зі схемою ТПН–АД у 8–12 разів.

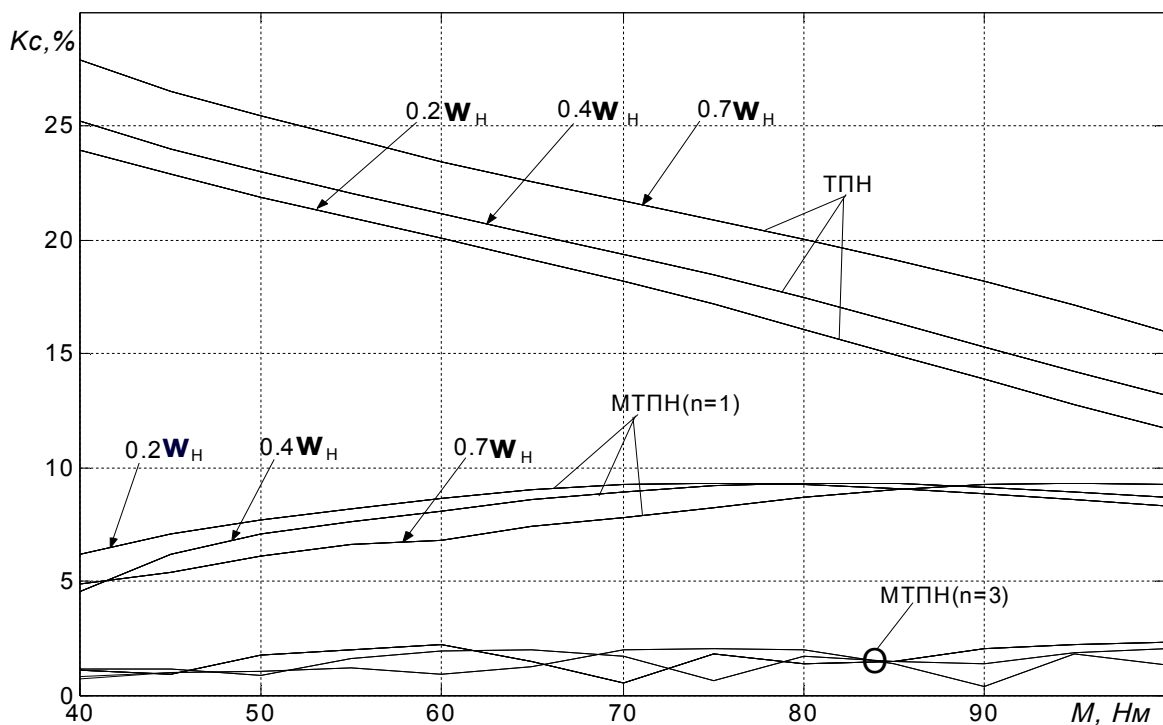


Рис. 5. Залежності $K_c(M)$ для систем ТПН–АД і МТПН–АД при $\omega = const$

На рис. 6 показано отримані залежності вищих гармонік струмів ($v = 2, 3, 4, \dots, 20$) при $\omega = 0.7\omega_n$ для системи ТПН-АД, а на рис. 7 – для системи МТПН-АД з трьома паралельними тиристорно-реакторними групами, послідовно увімкненими в кожній фазній гілці. Їх аналіз показує, що основними є непарні канонічні гармоніки струмів статора асинхронного двигуна за виключенням кратних трьом: $v = 5, 7, 11, 13, 17, \dots$. Парні гармоніки є нехтовно малими і виникають у таких схемах за умови динамічної несиметрії імпульсів керування тиристорів тиристорних груп у додатних і від’ємних півперіодах.

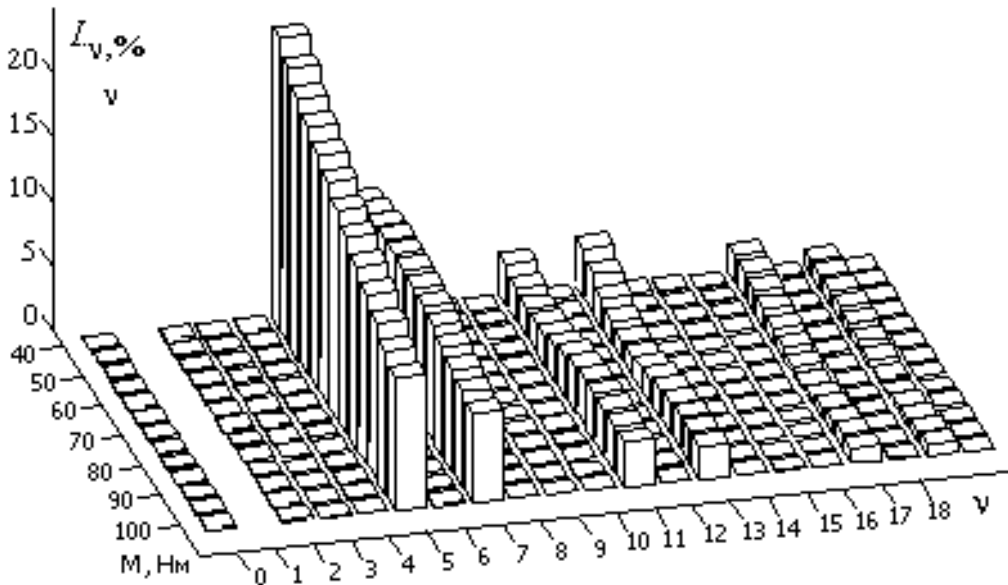


Рис. 6. Залежності $I_v(M)$ для системи електроприводу ТПН-АД при $\omega = 0.7\omega_n = const$

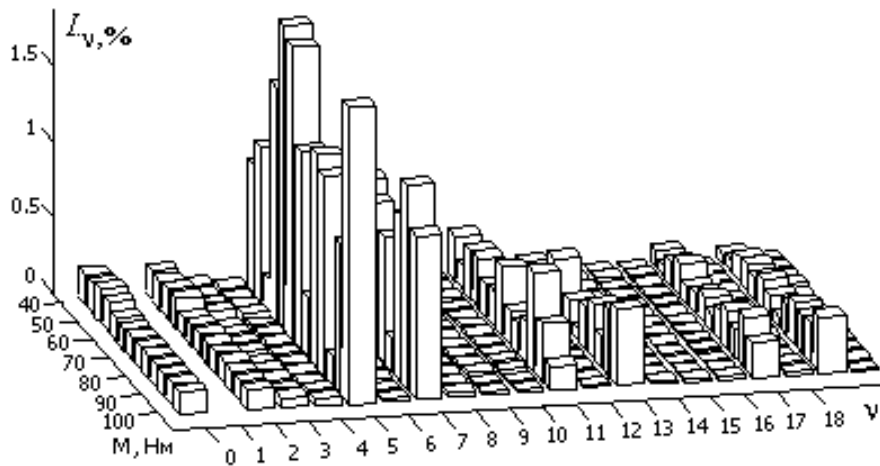


Рис. 7. Залежності $I_v(M)$ для системи МТПН-АД при $\omega = 0.7\omega_n = const; n=3$

Висновки. Аналіз отриманих результатів проведених досліджень показав, що при функціонуванні системи управління електроприводом за схемою МТПН-АД досягається значне зменшення рівня спотворення синусоїдності струмів у порівнянні із системою ТПН-АД. Це дає підставу стверджувати про доцільність її використання для управління асинхронними трифазними електроприводами в озброєнні та військово-технічних комплексах, оскільки вона забезпечує можливість виконання плавних пусків асинхронного електроприводу, регулювання і стабілізації швидкості в умовах дії динамічних навантажень, а також оптимізації енергоспоживання у цих режимах за

критеріями мінімуму додаткових втрат в асинхронному двигуні та показниками електромагнітної сумісності з радіоелектронними пристроями і системами за рахунок мінімізації рівня генерованих у мережу вищих гармонік струму.

Перспективи подальших досліджень. Доцільними, на наш погляд, є подальші дослідження застосування системи МТПН–АД у військово-технічних комплексах з метою синтезу оптимальних законів зміни напруги на статорі асинхронного двигуна при використанні моделі спостерігача в контурі системи управління, який забезпечував би прогнозне управління в умовах нелінійної зміни динаміки навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода : учеб. пособ. для вузов / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 616 с.
2. Иванов В. А. Тиристорные регуляторы напряжения для асинхронных двигателей / В. А. Иванов и др. // Методы исследования динамики, способы построения системы автоматического регулирования. – М., 1990. – 101с.
3. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львів: Вища школа, 1986. – 166 с.
4. Костинюк Л. Д. Моделирование электроприводов / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів: Національний університет „Львівська політехніка”, 2004. – 404 с.

Подано 04.11.09

Ю. В. Шабатура, Я. С. Паранчук, В. О. Чумакевич
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫМИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С
УЛУЧШЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ

Статья посвящена разработке энергосберегающей системы управления трёхфазными электроприводами военно-технических комплексов, отличающаяся улучшенной электромагнитной совместимостью.

Y. V. Shabatura, Ya. S. Paranchuk, V. O. Chumakevich
SYSTEM SAVING ENERGY OF CONTROL THREE-PHASE ELECTRIC DRIVE
MILITARY-TECHNICAL COMPLEX WITH PERFECTED BY ELECTROMAGNETIC
COMPATIBILITY

This article is dedicated to system development saving energy of control three-phase electric drive military-technical complex, differing perfected by electromagnetic compatibility.