

УДК 621.34

Я.С. Паранчук, О.Г. Плахтина, В.І. Мороз, Д.В. Уханська

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедри ЕАП, вищої математики

АНАЛІЗ ГАРМОНІК СТРУМУ МАГНІТНО-ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ У НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ

© Паранчук Я.С., Плахтина О.Г., Мороз В.І., Уханська Д.В., 2002

Описано сферу застосування та характеристику режимів розробленого магнітно-тиристорного перетворювача напруги. Наведена його математична модель, отримані на створеній цифровій моделі процеси зміни струмів і результати їх гармонічного аналізу у несиметричних режимах при детермінованому і випадковому процесах зміни кутів регулювання тиристорів.

The area of application and characteristic of modes of proposed magneto-thyristor voltage transformer is described. Its mathematical model is shown along with obtained results of simulation. They include processes of current change in asymmetric modes for determined and random processes of thyristor regulation angle change. The results of harmonic analysis of current are also shown.

Для швидкодіючого регулювання режимів потужних трифазних об'єктів (шунтових реакторів керованих статичних компенсаторів реактивної потужності, асинхронних електроприводів, електротермічних установок, наприклад, печей опору тощо) використовують тиристорні перетворювачі напруги (ТПН), що будуються на основі тиристорних груп – ланок зі зустрічно-паралельним сполученням тиристорів, які в кожній фазі вмикаються послідовно з навантаженням. Але їх робота супроводжується несинусоїдними режимами зі значними відхиленнями форми струму навантаження від синусоїдної. Зрозуміло, що наявність таких режимів є небажаною, бо призводить до додаткових втрат електроенергії, прискореного старіння ізоляції, погіршення показників якості енергії у точці приєднання такого навантаження до мережі, зниження надійності електропостачання тощо.

Для зменшення негативного впливу на мережу керованих за такою схемою об'єктів, зокрема, зведення рівня генерованих у мережу вищих гармонік струму до чинних норм, використовують фільтрокомпенсуючі пристрої відповідної потужності. Ефективність такого підходу, коли зусилля спрямовуються на подолання наслідку дії несинусоїдних режимів, є невисокою. Доцільнішим, на наш погляд, є розроблення схемотехнічних чи алгоритмічних рішень, спрямованих на зменшення рівня прояву нелінійності – спотворення форми струму навантаження у джерелі її дії.

Для цього в [1] запропоновано схему магнітно-тиристорного перетворювача напруги (МТПН), що будується на основі паралельних тиристорно-реакторних груп – паралельного сполучення тиристорної групи і реактора, які в кожній фазі вмикаються послідовно з навантаженням. Для такої схеми і діапазону регулювання струму навантаження в межах 1:5 існує менший рівень спотворення форми струму.

Зважаючи на це, актуальною постає задача отримання числових характеристик рівня спотворення форми струму навантаження при використанні зазначених вище перетворювачів напруги для інших однакових умов роботи – характері зміни навантаження і діапазоні регулювання струму. Якщо для симетричного лінійного навантаження ці числові

характеристики можна отримати на основі аналітичних залежностей як функцій кута регулювання тиристорів, то для змінних несиметричних навантажень чи пофазній асиметрії керуючих імпульсів і особливо за випадкового характеру їх зміни розв'язати цю задачу можна лише математичним моделюванням. Режими з вказаним характером зміни навантаження і кутів керування тиристорними групами спостерігаються для регулювання струмів дуг за певними законами (наприклад, стабілізації струмів) для випадкових флуктуацій довжин дуг (зміні навантаження) дугових печей чи, наприклад, при регулюванні струмів шунтових реакторів статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності, де опір шунтового реактора є незмінний, а кути тиристорних груп регулюються у функції, що впливає з вибраного закону керування режимом споживання реактивної потужності.

Для дослідження процесів зміни та гармонічного складу струмів навантаження описаних вище двох типів схем тиристорних перетворювачів напруги ТП необхідно розробити їх математичну і цифрову моделі. Схема силового кола магнітно-тиристорного перетворювача напруги зображена на рис. 1.

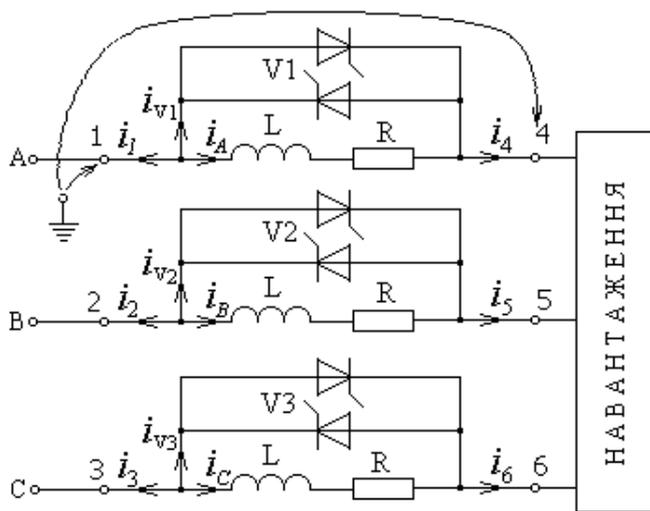


Рис. 1. Схема силового кола МТПН

Математичну модель такого МТПН як окремого елемента системи регулювання електричних координат трифазних об'єктів з несиметричними режимами складемо відповідно до основних положень теорії моделювання електромашинно-вентильних систем [2–3], методологічним базисом якої є метод вузлових потенціалів.

Математична модель системи за такого підходу подається замкнутою системою диференціальних рівнянь окремих структурних елементів та рівнянь для розрахунку потенціалів вузлів системи, а кожен структурний елемент розглядається як багатополосник, що описується відповідними

зовнішніми і внутрішніми векторними рівняннями вигляду:

$$f_e(\vec{i}_e, p\vec{i}_e, \vec{\varphi}_e, \vec{y}_1, p\vec{y}_1, \vec{y}_2) = 0, \quad (1)$$

де $\vec{i}_e, p\vec{i}_e, \vec{\varphi}_e$ – вектори струмів, похідних струмів зовнішніх віток та потенціалів зовнішніх вузлів структурного елемента відповідно; $\vec{y}_1, p\vec{y}_1$ – вектори решти змінних структурного елемента, які не входять у вектор \vec{i}_e (струми внутрішніх віток чи контурів структурного елемента, напруги на ємностях, механічні координати тощо) та вектор їх похідних відповідно; \vec{y}_2 – вектор змінних, які не мають у системі рівнянь похідних (крім потенціалів зовнішніх вузлів структурного елемента, які входять у вектор $\vec{\varphi}_e$).

Зі системи рівнянь, що подається векторним рівнянням (1), за допомогою алгебричних перетворень отримуємо матрично-векторне рівняння (2), що є зовнішнім векторним рівнянням електричного багатополосника, яке подає електричну схему структурного елемента і внутрішні рівняння для розрахунку векторів $p\vec{y}_1$ та \vec{y}_2 (3):

$$p\vec{i}_e + \overset{\vee}{G}_e \vec{\varphi}_e + \vec{C}_e = 0; \quad (2)$$

$$\vec{p}y_1 = f_1(\vec{i}_e, \vec{p}i_e, \vec{y}_1); \quad \vec{y}_2 = f_2(\vec{i}_e, \vec{p}i_e, \vec{y}_1), \quad (3)$$

де $\overset{\vee}{\mathbf{G}}_e, \vec{C}_e$ – матриця ($n \times n$) і вектор розміру n , елементи яких визначають параметри структурного елемента; n – кількість полюсів електричного багатополіусника, що подає структурний елемент схеми; p – оператор диференціювання.

Матрично-векторні рівняння (2) та (3) подають у загальному випадку універсальну математичну модель структурного елемента досліджуваної системи.

Далі подається процедура отримання математичної моделі МТПН у вигляді матрично-векторних рівнянь (2) і (3), яка ґрунтується на основних положеннях описаної вище методики.

Запишемо рівняння балансу напруг для кожної фазної вітки паралельної тиристорно-реакторної групи (ТРГ) (рис. 1) та рівняння балансу похідних струмів для кожного внутрішнього вузла схеми:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_4 - Lp i_A - R i_A &= 0; \\ \varphi_2 - \varphi_5 - Lp i_B - R i_B &= 0; \\ \varphi_3 - \varphi_6 - Lp i_C - R i_C &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} p i_1 + p i_A + p i_{v1} &= 0; \\ p i_2 + p i_B + p i_{v2} &= 0; \\ p i_3 + p i_C + p i_{v3} &= 0; \\ p i_4 - p i_A - p i_{v1} &= 0; \\ p i_5 - p i_B - p i_{v2} &= 0; \\ p i_6 - p i_C - p i_{v3} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тепер визначимо $p i_A, p i_B, p i_C$ з (4) і підставимо їх вирази в (5). 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 матрично-векторне рівняння:

$$\dot{i} + \overset{\vee}{\mathbf{G}} \vec{\varphi} + \vec{C} + \overset{\vee}{\mathbf{A}} p i_v = 0, \quad (6)$$

де $\dot{i} = (i_1, i_2, \dots, i_6)^T$; $\vec{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6)^T$ – вектор струмів зовнішніх віток та вектор потенціалів зовнішніх вузлів електричного багатополіусника паралельної ТРГ, тобто віток, що виходять з цього багатополіусника і вузлів – точок можливого під'єднання цього багатополіусника в структуру досліджуваної системи;

$$\overset{\vee}{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L \\ -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix}$$

i

$$\vec{\mathbf{C}} = \left[-R_{iA}/L \quad -R_{iB}/L \quad -R_{iC}/L \quad R_{iA}/L \quad R_{iB}/L \quad R_{iC}/L \right]^T$$

– матриця та вектор, що визначаються параметрами паралельної ТРГ; $\vec{i}_v = (i_{v1}, i_{v2}, i_{v3})^T$ – вектор струмів трифазного біполярного тиристорного ключа;

$$\overset{\vee}{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T$$
 – матриця, що визначається внутрішньою схемою сполучення біполярного тиристорного ключа та реактора.

Отримане векторне рівняння (6) є зовнішнім векторним рівнянням паралельної ТРГ і використовується для підмикання цього структурного елемента до схеми досліджуваної системи.

Математична модель паралельної ТРГ включає також і систему внутрішніх рівнянь:

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_4 - U_{v1} &= 0; \\ \varphi_2 - \varphi_5 - U_{v2} &= 0; \\ \varphi_3 - \varphi_6 - U_{v3} &= 0, \end{aligned}$$

запис якої у матричній формі має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5 \quad \varphi_6]^T - \begin{bmatrix} U_{v1} \\ U_{v2} \\ U_{v3} \end{bmatrix} = 0$$

або подається матрично-векторним рівнянням:

$$\overset{\vee}{\mathbf{A}}^T \cdot \vec{\varphi} - \vec{U}_v = 0. \quad (7)$$

Рівняння (6) і (7) подають математичну модель магнітно-тиристорного перетворювача напруги як структурного елемента. Ця математична модель входить у загальну модель досліджуваної системи, до якої під'єднаний МТПН, на основі рівнянь

$$\sum_{j=1}^m \overset{\vee}{\mathbf{P}}_j \cdot \vec{p}_{ij} = 0; \quad \vec{\varphi}_j = \overset{\vee}{\mathbf{P}}_j^T \cdot \vec{\varphi}_c. \quad (8)$$

Тоді рівняння (7) з врахуванням другого рівняння (8) можна записати

$$\overset{\vee}{\mathbf{A}}^T \cdot \overset{\vee}{\mathbf{P}}^T \cdot \vec{\varphi}_c - \vec{U}_v = 0. \quad (9)$$

Підставивши в перше рівняння (8) зовнішні рівняння структурних елементів разом з рівнянням (6) і беручи до уваги друге рівняння (8), отримаємо

$$\left(\sum_{j=1}^m \overset{\vee}{\Pi}_j \overset{\vee}{G}_j \overset{\vee}{\Pi}_j^T \right) \overrightarrow{\varphi}_C + \sum_{j=1}^m \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \overrightarrow{C}_j + \overset{\vee}{\Pi} \overset{\vee}{A} \overrightarrow{p}i_v = 0, \quad (10)$$

де $\overset{\vee}{\Pi}$ – матриця підмикання (інциденцій) схеми магнітно-тиристорного перетворювача напруги до схеми досліджуваної системи; $j = 1, 2, \dots, m$ – номери структурних елементів схеми.

В отриманій системі рівнянь, яку становлять рівняння (9) і (10), невідомими є вектори $\overrightarrow{\varphi}_C$, \overrightarrow{U}_v , $\overrightarrow{p}i_v$. Цю систему можна розв'язати, якщо функціонально пов'язати між собою вектори \overrightarrow{U}_v та $\overrightarrow{p}i_v$. Математичний зв'язок між цими векторами можна встановити на основі умови роботи (поточного стану) зустрічно-паралельного сполучення тиристорів як ідеального біполярного тиристорного ключа:

$$\begin{cases} U_{v_k} = 0, & \text{якщо ключ у відкритому стані;} \\ p i_{v_k} = 0, & \text{якщо ключ у закритому стані,} \end{cases}$$

де $k = 1, 2, 3$ – номер ключа, тобто ключа у фазі А, В та С МТПН відповідно.

Наведені умови стану для всіх ключів пов'яжемо такою математичною залежністю:

$$\overset{\vee}{Z} \overrightarrow{U}_v + \overset{\vee}{S} \overrightarrow{p}i_v = 0, \quad (11)$$

де

$$\overset{\vee}{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix}; \quad \overset{\vee}{S} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{bmatrix}; \quad Z_k = \begin{cases} 1 & \text{для закритого ключа;} \\ 0 & \text{для відкритого ключа;} \end{cases}$$

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{для відкритого ключа;} \\ 0 & \text{для закритого ключа;} \end{cases}$$

Рівняння (9), (10) і (11) є замкненою системою алгебричних рівнянь, яка розв'язується відносно невідомих $\overrightarrow{\varphi}_C$, \overrightarrow{U}_v , $\overrightarrow{p}i_v$. У матричній формі вони мають вигляд

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m \overset{\vee}{\Pi}_j \overset{\vee}{G}_j \overset{\vee}{\Pi}_j^T & \overset{\vee}{\Pi} \overset{\vee}{A} & \overset{\vee}{0} \\ \overset{\vee}{\Pi}^T \overset{\vee}{A}^T & \overset{\vee}{0} & \overset{\vee}{-1} \\ \overset{\vee}{0} & \overset{\vee}{S} & \overset{\vee}{Z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overrightarrow{\varphi}_C \\ \overrightarrow{p}i_v \\ \overrightarrow{U}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m \overset{\vee}{\Pi}_j \overset{\vee}{C}_j \\ \overset{\vee}{0} \\ \overset{\vee}{0} \end{bmatrix} = 0, \quad (12)$$

де $\overset{\vee}{0}$, $\overset{\vee}{1}$ – нульова та одинична матриці відповідно.

У створеній математичній моделі магнітно-тиристорного перетворювача напруги вектор похідних є таким:

$$\overrightarrow{p}i_v = (p i_A, p i_B, p i_C, p i_{v1}, p i_{v2}, p i_{v3}, p i'_{v1}, p i'_{v2}, p i'_{v3}),$$

де $p i'_{v1}, p i'_{v2}, p i'_{v3}$ – похідні струмів зворотних тиристорів. У цій моделі струми тиристорів є лише додатними, а їх похідні можуть бути додатними чи від'ємними.

Алгоритм зведення отриманої системи рівнянь до нормальної форми Коші передбачає виконання такої послідовності обчислень:

- обчислюються коефіцієнти вузлових рівнянь структурних елементів досліджуваної системи, зокрема й рівняння (6);

- визначаються матриці $\overset{\vee}{S}$ і $\overset{\vee}{Z}$;
- формується система рівнянь (12);
- розв'язується система рівнянь (12) відносно векторів $\overrightarrow{\Phi_c}, \overrightarrow{p}_v, \overrightarrow{U}_v$;
- обчислюються значення потенціалів структурних елементів $\overrightarrow{\Phi}_j$;
- розраховуються значення похідних.

Отримана вище математична модель МТПН була включена у структуру повної математичної моделі системи живлення та регулювання струмів активно-індуктивного навантаження і реалізована у середовищі програмування FORTRAN.

Математична модель тиристорного перетворювача напруги, що складається на основі послідовних сполучень тиристорних груп з навантаженням, була складена за аналогічним підходом і реалізована у тому ж середовищі програмування.

На створених цифрових моделях виконувалися математичні експерименти з дослідження гармонічного складу струму навантаження у несиметричних режимах для різних значень і характеристик зміни параметрів навантаження і кутів керуючих імпульсів. Далі як приклад наводяться результати моделювання цих режимів для сталого і симетричного активно-індуктивного навантаження і випадкового характеру зміни кутів $\alpha_j(t)$ (j – фаза А, В чи С) відкриваючих тиристори імпульсів. Процеси зміни кутів керування тиристорними групами в математичних експериментах дослідження різних перетворювачів напруги формувалися за виразом $\alpha_j(t) = \alpha_j'(t) \cdot k + M$, де $\alpha_j'(t)$ – центровані випадкові процеси зміни кутів, які приймали однаковими у дослідженнях обох типів перетворювачів; k та M – коефіцієнти, значення яких визначаються окремо для кожного перетворювача з умови отримання однакового діапазону регулювання струмів навантаження. Аналіз гармонічного складу струмів навантаження виконувався розкладом у ряд Фур'є на кожному періоді основної частоти.

На основі розрахованих осцилограм процесів зміни діючого значення струмів $i_j(t)$, коефіцієнта несинусоїдності $K_{нj}(t)$ і відносних значень першої $i_{1j}(t)$ і вищих $i_{vj}(t)$ ($v = 2 \dots 15$) гармонік струмів навантаження та їх інтегральних значень (математичних сподівань на часових проміжках інтегрування $T = 20$ с) здійснювали порівняльний аналіз гармонічного складу струмів і формулювали висновки про ефективність застосування того чи іншого перетворювача напруги для регулювання режимів досліджуваних об'єктів із описаними вище характеристиками зміни навантаження.

На рис. 2, а, як приклад, показані отримані на складеній цифровій моделі усталені процеси зміни струмів навантаження кожної фази $i_j(t)$ у несиметричному режимі для таких значень кутів регулювання тиристорів: $\alpha_A = 15^0$; $\alpha_B = 30^0$; $\alpha_C = 45^0$ для лінійного симетричного навантаження і використання МТПН, а на рис. 2, б – процеси $i_j(t)$ для цих же кутів керування тиристорами і роботі ТПН. Коефіцієнт несинусоїдності форми струму навантаження фази А у цих несинусоїдних режимах дорівнює: $K_{нА} = 0,0426$; $K_{нА} = 0,0767$ (рис. 2, а та б відповідно). На рис. 3 і 4 зображені отримані на цифровій моделі результати математичних експериментів з дослідження несиметричних режимів при дії випадкових

процесів зміни кутів регулювання тиристорами $\alpha_j(t)$: на рис. 3 – при роботі МТПН, а на рис. 4 – при функціонуванні ТПН. На цих рисунках зображено випадкові процеси зміни кутів регулювання тиристорів $\alpha_j(t)$ (на частинах (а)), відносного діючого значення струму фази А $i_A(t)$ і його коефіцієнта несинусоїдності $K_{HA}(t)$ (на частинах (б) та (в) відповідно). Значення струмів навантаження та їх гармонік нормувалися до амплітудного значення струму навантаження у симетричному режимі, отриманого для $\alpha_j(t) = 0$.

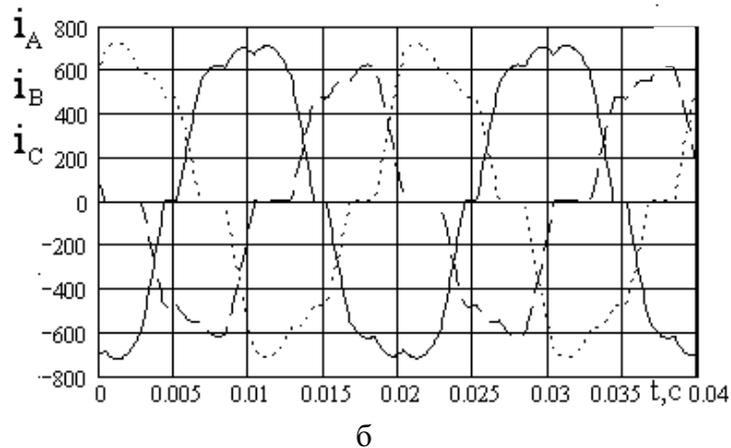
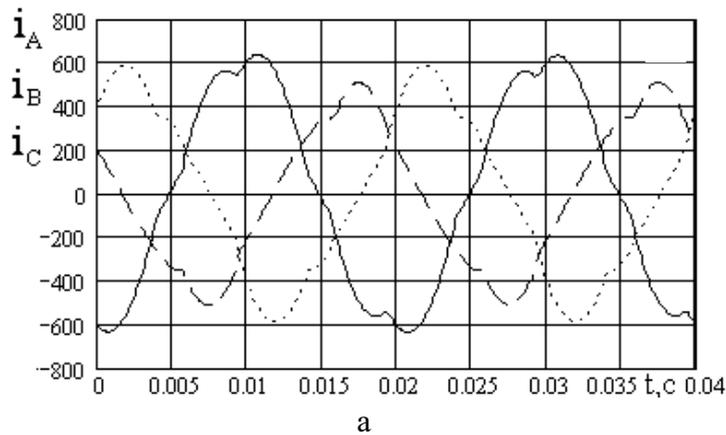
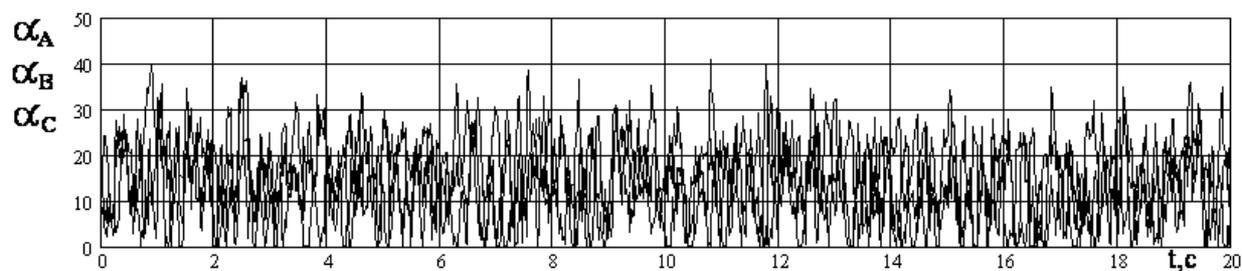


Рис. 2. Процеси зміни струмів навантаження при роботі МТПН (а) і ТПН (б) для $\alpha_A = 15^\circ$; $\alpha_B = 30^\circ$; $\alpha_C = 45^\circ$

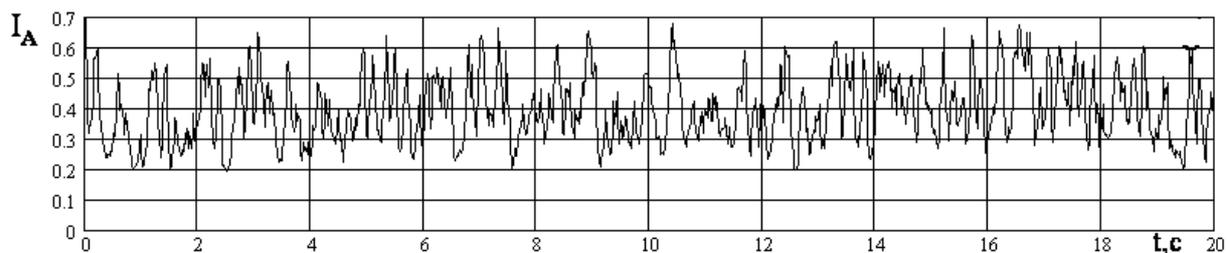
Усереднені за трьома фазами математичні сподівання коефіцієнта несинусоїдності на періоді інтегрування і відносні значення амплітуди першої та переважаючих у спектрі вищих ($\nu = 3, 5, 7, 9, 11, 13$) гармонік струму навантаження зведені у таблиці.

Результати спектрального аналізу струму навантаження МТПН і ТПН

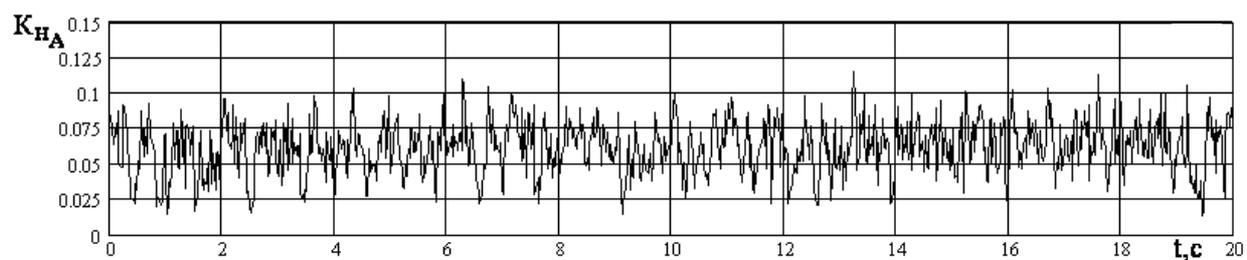
K_n, I_ν	\bar{K}_H	\bar{I}	\bar{I}_1	\bar{I}_3	\bar{I}_5	\bar{I}_7	\bar{I}_9	\bar{I}_{11}	\bar{I}_{13}	\bar{I}_{15}
ПН										
МТПН	0,0612	0,396	0,556	0,0397	0,0266	0,0127	0,00733	0,00481	0,00367	0,00283
ТПН	0,0938	0,424	0,590	0,0557	0,0534	0,0240	0,0108	0,00751	0,00580	0,00421



а

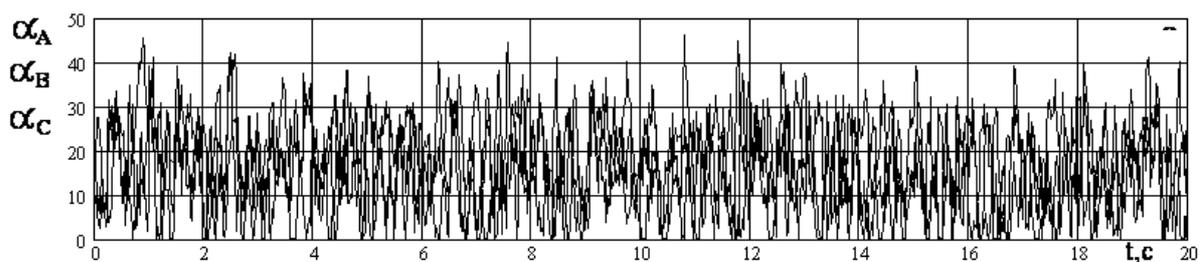


б

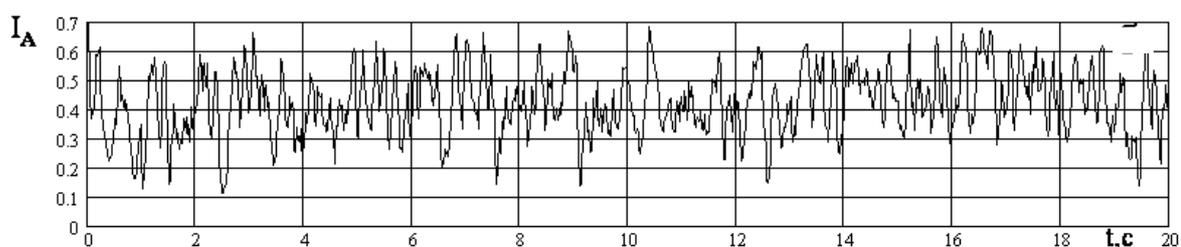


в

Рис. 3. Процеси зміни кутів регулювання тиристорів і відповідні їм часові залежності діючого значення струму $i_A(t)$ та коефіцієнта несинусоїдності $K_H(t)$ для роботи МТПН



а



б

Рис. 4. Процеси зміни кутів регулювання тиристорів і відповідні їм часові залежності діючого значення струму $i_A(t)$ та коефіцієнта несинусоїдності $K_H(t)$ для роботи ТПН

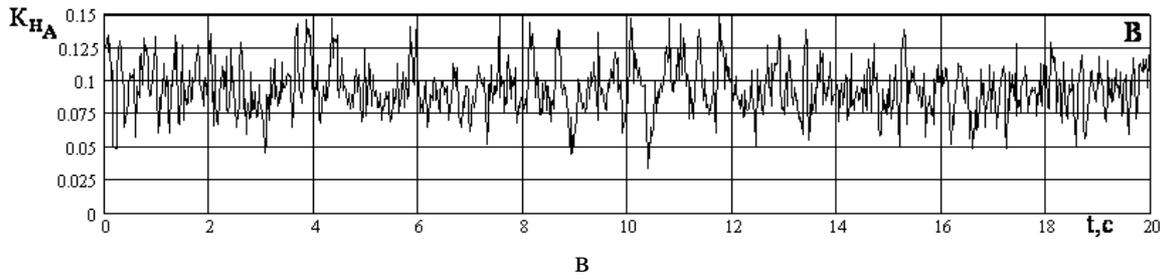


Рис. 4. Процеси зміни кутів регулювання тиристорів і відповідні їм часові залежності діючого значення струму $i_d(t)$ та коефіцієнта несинусоїдності $K_n(t)$ для роботи ТПН

Аналіз отриманих на цифровій моделі процесів зміни струмів навантаження та їх інтегральних характеристик – математичного сподівання діючого значення \bar{I} , амплітуд першої \bar{I}_1 , вищих гармонік \bar{I}_v та коефіцієнта несинусоїдності \bar{K}_n при використанні в математичних експериментах різних реалізацій випадкових процесів $\alpha_j(t)$ показує, що при роботі магнітно-тиристорного перетворювача напруги і однаковому діапазоні зміни струмів навантаження фаз $i_j(t)$ отримуємо менше спотворення форми струмів: коефіцієнт несинусоїдності зменшується в 1,4–1,7 разів, а окремих амплітуд вищих гармонік в 1,4–2,0 рази. Це дає підставу стверджувати, що для об'єктів з порівняно невеликим діапазоном регулювання струму навантаження доцільніше використовувати магнітно-тиристорний перетворювач напруги.

1. А. с. 1211851 СССР. Магнитный усилитель / В.Т. Бардачевский, А.А. Кардашов, О.Ю. Лозинский, Я.С. Паранчук // Открытия. Изобрет. – 1986. – № 6. 2. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львів, 1986. – 164 с. 3. Плахтына Е.Г. Применение метода узловых потенциалов для расчета переходных процессов в электрических цепях // Теоретическая электротехника. – 1978. – Вып. 24. – С. 44–46.