

# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФАЗОВИХ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Голубев В.В., ст. наук. співробітник

Інститут електродинаміки НАН України

Грудська В.П., доц., Спінул Л.Ю., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вещиков Г.В., Зінченко О.Ю., студенти

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** В електротехнічній галузі для регулювання, стабілізації, а також зміни форми і частоти напруги широко використовують імпульсні трансформаторно-ключові перетворювальні пристрої. Ефективність перетворення змінної напруги такими пристроями залежить від досконалості побудови, точності вибору параметрів виконавчих структур і в значній мірі від оптимального алгоритму керування цими структурами. [1] Фахівцями розроблено різні способи імпульсного регулювання змінної напруги: широтно-імпульсний, частотно-імпульсний, кодоімпульсний тощо. На даний час в інженерній практиці найбільш поширене фазове регулювання, яке здійснюють декількома способами (рис. 1): регулюванням кута вмикання ключів (рис. 1, а); регулюванням кута вимикання ключів (рис. 1, б); симетричним регулюванням (рис. 1, в, г); лінійно-фазовим регулюванням (рис. 1, д, е).

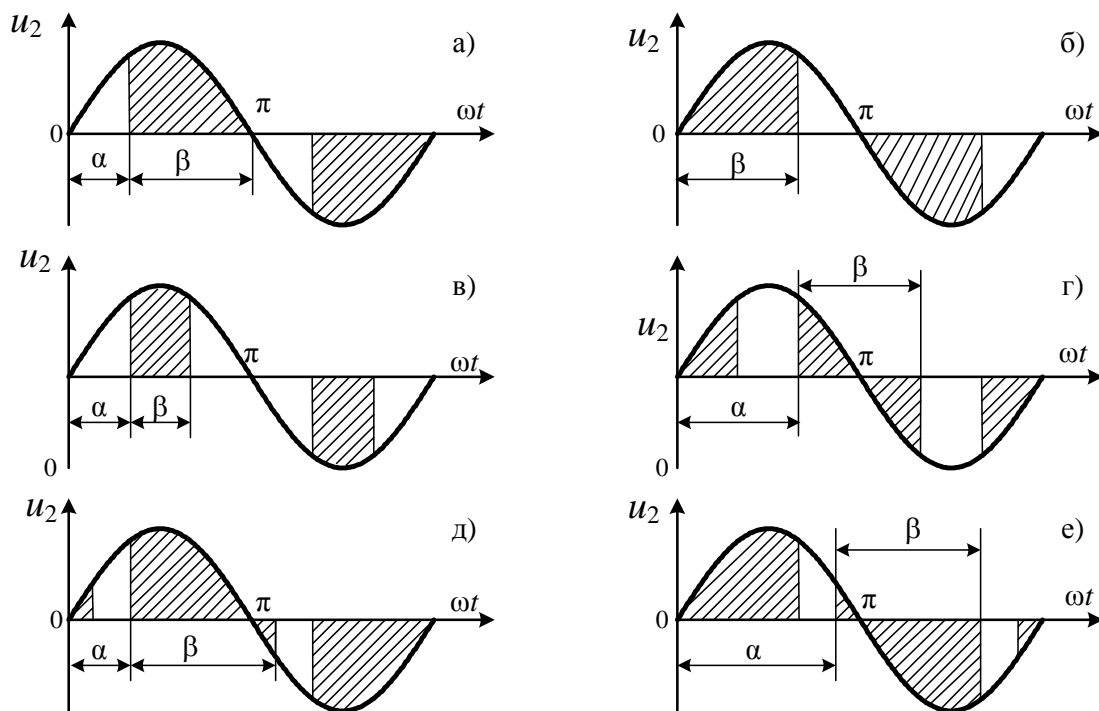


Рисунок 1 – Способи фазового регулювання напруги: а) кутом вмикання тиристорів; б) кутом їх вимикання; в), г) симетричне; д), е) лінійно-фазове.

Вказані способи забезпечують заданий алгоритм керування і, відповідно, задану форму вихідної напруги незалежно від величини і характеру навантаження лише за умови використання повністю керованих ключів – тиристорів зі штучною комутацією або транзисторів. Найчастіше навантаження імпульсних регуляторів змінної напруги має активно-індуктивний характер. Аналіз роботи таких систем у трансформаторному і безтрансформаторному варіантах достатньо повно проведено у [2]. Наразі видається корисним для інженерної практики дослідити особливості процесів при роботі імпульсного перетворювача з фазовим регулюванням напруги на активно-ємнісне навантаження.

**Мета роботи:** порівняльний аналіз фазових способів регулювання вихідної напруги трансформаторно-тиристорного перетворювача з активно-ємнісним навантаженням.

**Результати досліджень.** Схему досліджуваного імпульсного регулятора, побудовану на вольтододатному трансформаторі з коефіцієнтом трансформації  $n=2$  подано на рис. 2 і прийнято звичайні припущення: трансформатор і тиристори ідеальні, комутація миттєва, мережа живлення – ідеальне джерело синусоїдної напруги.

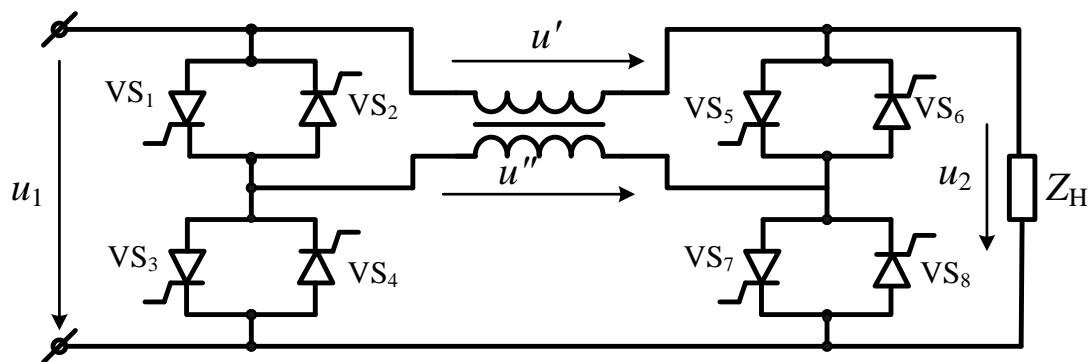


Рисунок 2 – Електрична схема досліджуваного регулятора

У роботі досліджувались вхідні показники перетворювача, а саме: коефіцієнт зсуву фази  $K_\varphi$  основної гармоніки струму мережі; коефіцієнт спотворення  $K_C$  кривої струму мережі; вхідний коефіцієнт потужності  $K_I$ ; повна  $S$ , активна  $P$  та реактивна  $Q$  потужності, споживані з мережі.

Для визначення вказаних показників у роботі вибрано як математичний апарат ряди Фур'є, оскільки такий спосіб дає наочну картину спектрального аналізу. Розрахунки проводилися у відносних одиницях. За базові було прийнято амплітуду напруги мережі  $U_m$  і амплітуду струму  $I_m$  за відсутності регулювання; нормовані величини позначені зіркою. Враховано, що переважна більшість споживачів потребує регулювання напруги за основною частотою, тому розрахункові формули записано через косінусний  $A_{(1)}$  та синусний  $B_{(1)}$  коефіцієнти ряду Фур'є для основної гармоніки:

1. коефіцієнт спотворень струму мережі  $K_C = I_{(1)} / I_1$ ;
2. коефіцієнт зсуву основної гармоніки струму мережі  $K_\varphi = \cos \varphi_{1(1)} = B_{(1)} / I_{1(1)}^* = B_{(1)} / \sqrt{A_{(1)}^2 + B_{(1)}^2}$ ;
3. вхідний коефіцієнт потужності  $K_{II} = K_\varphi K_C = B_{(1)} / I_1^*$ ;
4. повна потужність, споживана з мережі  $S_1^* = 2U_1 I_1 / U_m I_m = I_1^*$ ;
5. активна потужність, споживана з мережі  $P_1^* = P_2^* = 2P / U_m I_m = I_{1(1)}^* \cos \varphi_{1(1)} = B_{(1)}$ ;
7. реактивна потужність, споживана з мережі  $Q_1^* = 2Q / U_m I_m = I_{1(1)}^* \sin \varphi_{1(1)} = A_{(1)}$ ,

де  $I_1^*$  - нормоване діюче значення струму мережі,  $I_{1(1)}^*$  - нормована амплітуда цього струму.

Для обчислення коефіцієнтів  $A_{(1)}$ ,  $B_{(1)}$  і струму  $I_1^*$  мережі використано узагальнені формули імпульсного регулювання [3] і адаптовано їх до умов дослідження – фазова одноступенева модуляція з частотою мережі.

$$A_{(1)} = \frac{\cos \varphi}{2\pi} \left[ \cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \beta) \right] - \frac{\beta}{2\pi} \sin \varphi + \frac{\sin \varphi}{\pi \times \operatorname{ch} \frac{\pi}{2 \operatorname{tg} \varphi}} \left\{ \left[ \sin 2\varphi - \sin \left( \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \cos \frac{\beta}{2} \right] \operatorname{sh} \frac{\pi}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \left[ \sin 2\varphi \cos \frac{\beta}{2} - \sin \left( \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \right] \operatorname{sh} \frac{\pi - \beta}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \cos 2\varphi \sin \frac{\beta}{2} \operatorname{ch} \frac{\pi - \beta}{2 \operatorname{tg} \varphi} \right\};$$

$$B_{(1)} = \frac{\cos \varphi}{2\pi} \left[ \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \beta) \right] + \frac{\beta}{2\pi} \cos \varphi + \frac{\sin \varphi}{\pi \times \operatorname{ch} \frac{\pi}{2 \operatorname{tg} \varphi}} \left\{ \left[ \cos 2\varphi \cos \frac{\beta}{2} - \cos \left( \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \right] \operatorname{sh} \frac{\pi - \beta}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \left[ \cos 2\varphi - \cos \left( \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \cos \frac{\beta}{2} \right] \operatorname{sh} \frac{\pi}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \sin 2\varphi \sin \frac{\beta}{2} \operatorname{ch} \frac{\pi - \beta}{2 \operatorname{tg} \varphi} \right\};$$

$$I_1^* = \sqrt{\frac{\cos 2\varphi}{\pi} \left[ \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \beta) \right] - \frac{\sin 2\varphi}{\pi} \left[ \cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \beta) \right] + \frac{\beta}{\pi} \sin^2 \varphi + \frac{4 \sin \varphi}{\pi} g \left[ \sin \frac{\alpha + \beta}{2} e^{\frac{-\beta}{2 \operatorname{tg} \varphi}} - \sin \frac{\alpha}{2} \right] + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\pi} g^2 \left[ 1 - e^{\frac{-\beta}{\operatorname{tg} \varphi}} \right]},$$

$$\text{де } g = \frac{-1}{2 \cdot \text{ch} \frac{\pi}{2 \text{tg} \varphi}} \left[ \sin \left( \varphi - \frac{\alpha + \beta}{2} \right) e^{\frac{\beta - \pi}{2 \text{tg} \varphi}} + \sin \left( \varphi - \frac{\alpha}{2} \right) e^{\frac{\pi}{2 \text{tg} \varphi}} \right].$$

Дослідження проводилося для чотирьох способів фазового регулювання (рис. 1) за значень коефіцієнта потужності навантаження  $\cos \varphi = \{1; 0.8; 0.6; 0.4; 0.2\}$ . Розрахунки виконувались програмі MathLab. Їх результати подано на рис. 3-6 у вигляді графіків залежності вказаних вище показників регулятора від основної гармоніки вихідної напруги. Порівняння способів фазового регулювання проведено шляхом аналізу отриманих графіків.

*Особливості регулювання кутом вмикання тиристорів (рис. 3).*

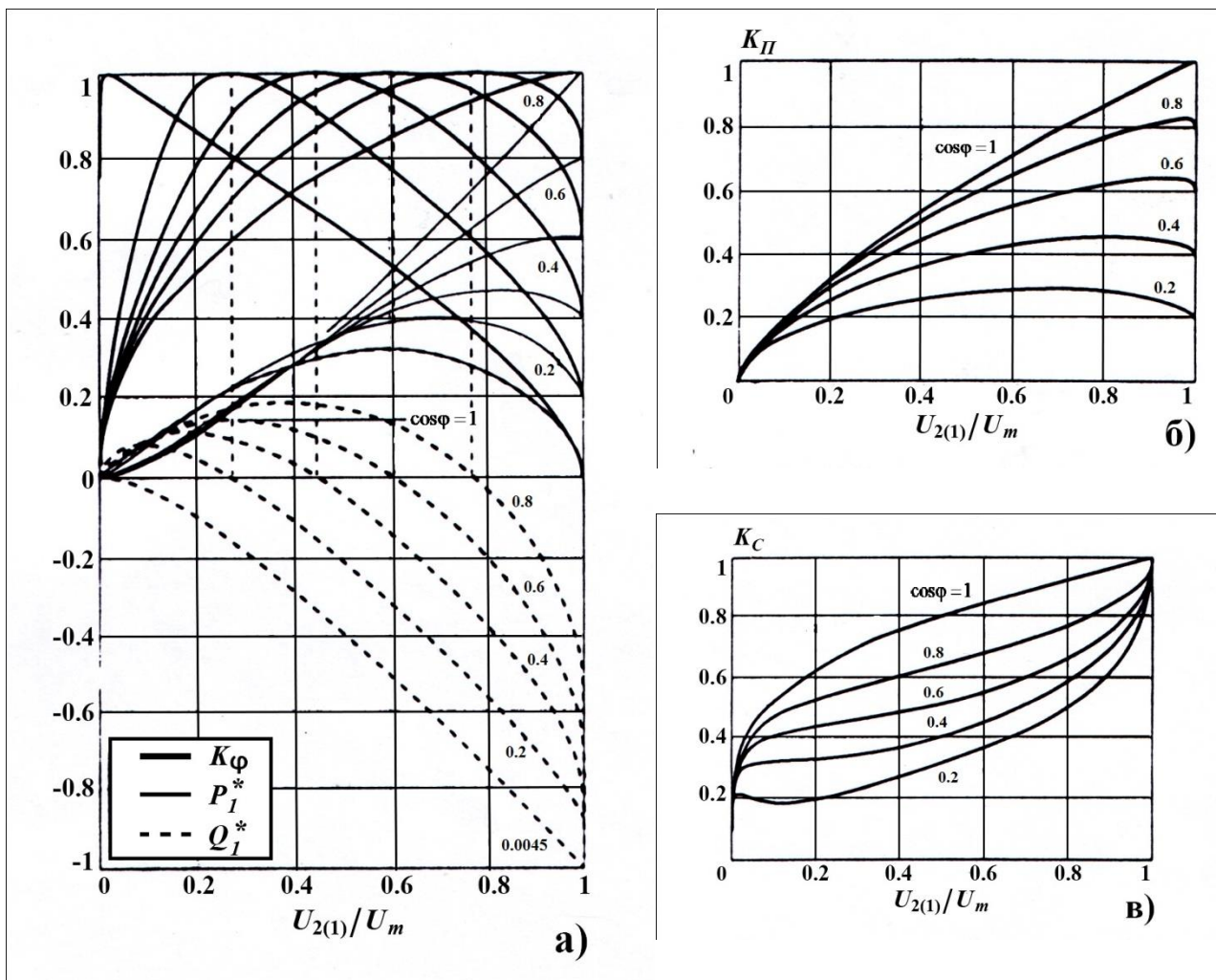


Рисунок 3 - Графіки залежності вхідних показників регулятора від вихідної напруги за регулювання кутом вмикання тиристорів

Коефіцієнт зсуву фази основної гармоніки струму мережі  $K_\varphi$  в екстремумі досягає 1, що свідчить про відсутність реактивної складової потужності на вході перетворювача (рис. 3, а). За менших кутів увімкнення

тиристорів реактивна потужність  $Q_1$  генерується, а за більших – споживається з мережі, тобто реакція регулятора змінюється з ємнісної на індуктивну внаслідок компенсації і перекомпенсації реактивної потужності навантаження (рис. 3, а). У випадках вузькодіапазонного регулювання така перекомпенсація відбувається лише за високих коефіцієнтів потужності навантаження  $\cos\varphi$  і глибокого регулювання вниз. Вхідний коефіцієнт потужності  $K_{II}$  регулятора зі збільшенням кута вмикання спочатку зростає і дещо перевищує коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\varphi$ , а потім монотонно спадає (рис. 3, б) через постійне зменшення коефіцієнта спотворення струму мережі  $K_C$  (рис. 3, в).

*Особливості регулювання кутом вмикання тиристорів (рис. 4).*

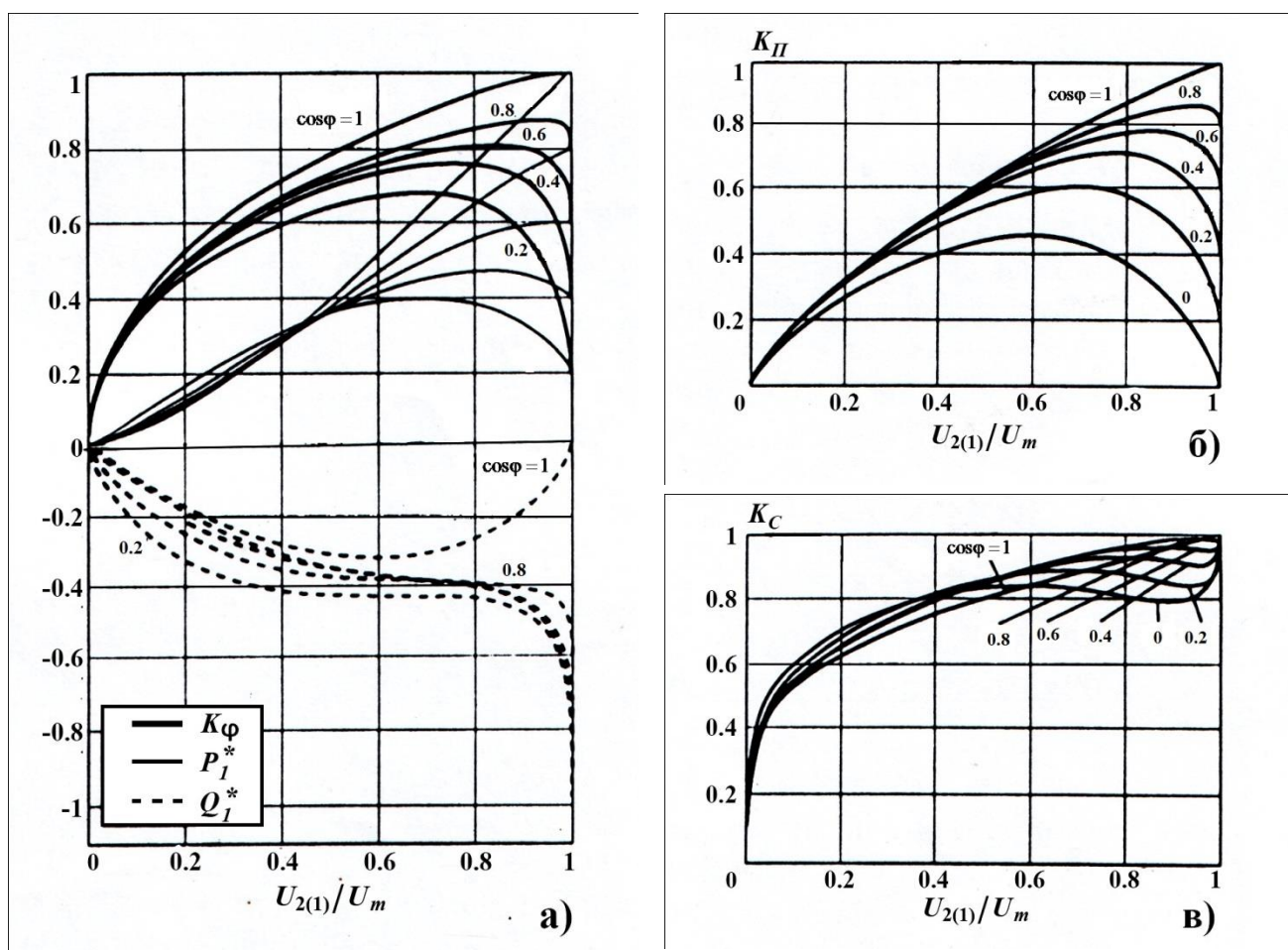


Рисунок 4 - Графіки залежності вхідних показників регулятора від вихідної напруги за регулювання кутом вмикання тиристорів

На відміну від попереднього способу коефіцієнт зсуву фази основної гармоніки  $K_\varphi$  не досягає 1 (рис. 4, а), тому цей спосіб не можна використовувати для регулювання потужності у широких межах. Реактивна потужність  $Q_1$  в усьому діапазоні регулювання не змінює знак, зберігаючи ємнісний характер (рис. 4, а). Порівняно з попереднім способом коефіцієнт

потужності  $K_{II}$  дещо вищий (рис. 4, б), а коефіцієнт спотворень  $K_C$  значно більший.

Симетричні способи регулювання (рис. 5).

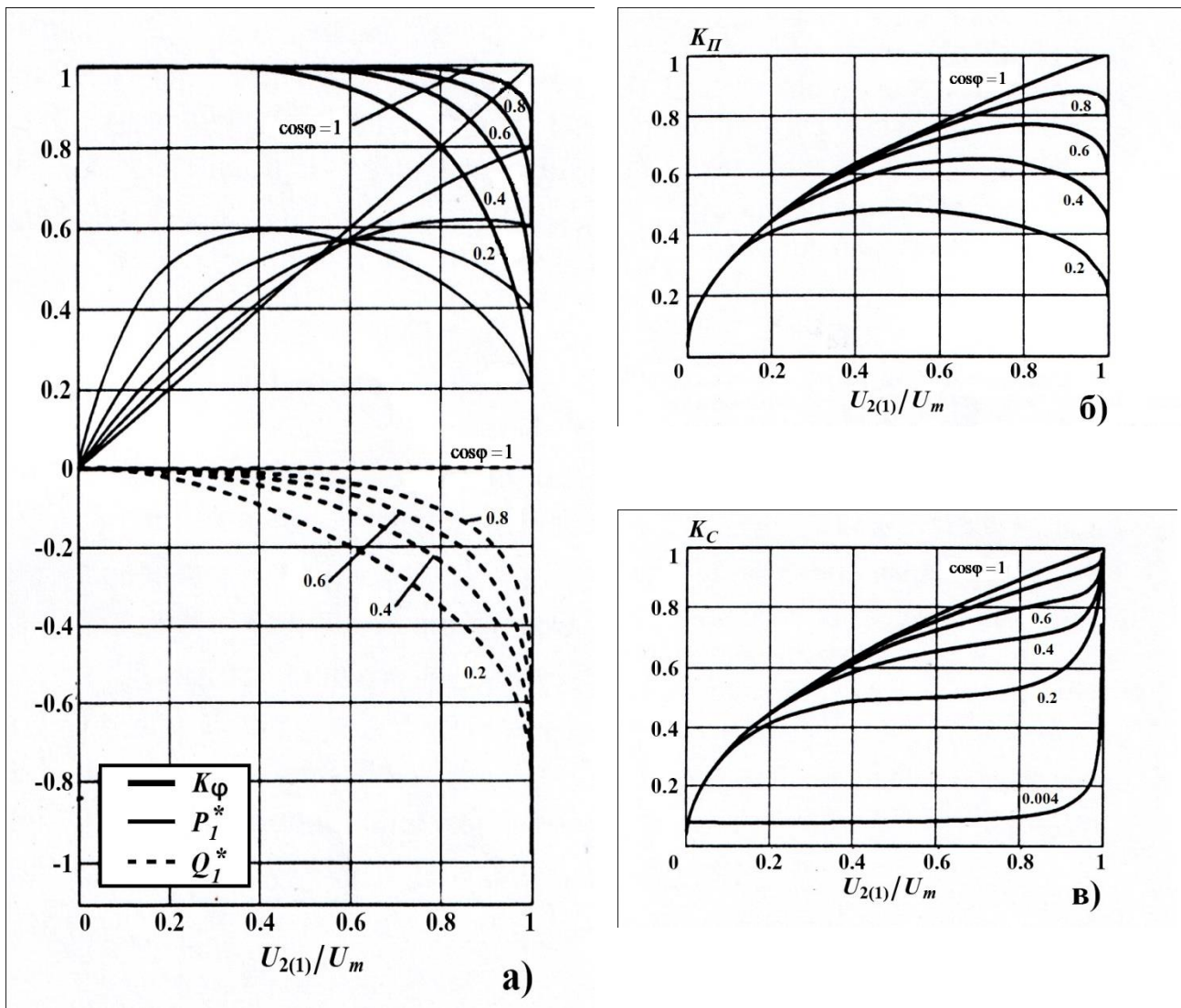


Рисунок 5 - Графіки залежності вхідних показників регулятора від вихідної напруги за симетричних способів регулювання

Зі зменшенням вихідної напруги коефіцієнт зсуву фази першої гармоніки струму мережі  $K_\phi$  асимптотично збільшується до одиниці; відповідно реактивна потужність  $Q_1$ , генерована регулятором, поступово спадає до нуля (рис. 5, а). При регулюванні ширини імпульсів у центрі півперіоду вхідний коефіцієнт потужності  $K_{II}$  суттєво перевищує коефіцієнт потужності навантаження (рис.5, б), однак  $K_{II}$  не досягає максимального значення через різке зменшення коефіцієнта спотворення струму мережі  $K_C$  (рис. 5, в).

Особливості лінійно-фазового регулювання (рис. 6).

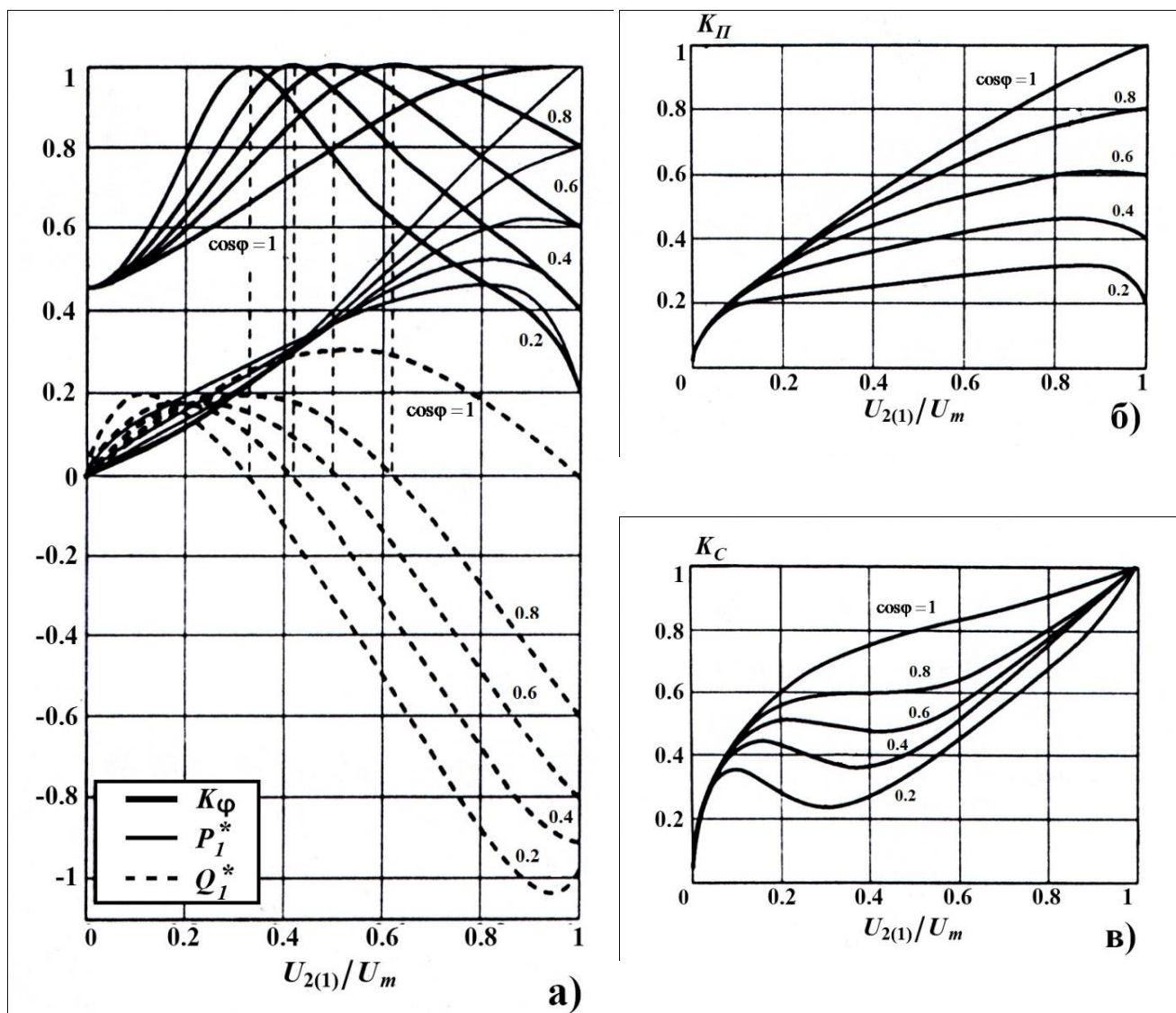


Рисунок 6 – Графіки залежності вхідних показників регулятора від вихідної напруги за лінійно-фазового регулювання

Такий спосіб дозволяє змінювати знак реактивної потужності перетворювача  $Q_1$  та регулювати її значення у широких межах (рис. 6, а). При цьому виникають суттєві спотворення вхідного струму (рис. 6, в) і, відповідно, погіршується вхідний коефіцієнт потужності  $K_{II}$  (рис. 6, б). Підвищити  $K_{II}$  можливо лише шляхом підключення фільтрів на вході перетворювача.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють оцінити доцільність використання того чи іншого способу фазового регулювання залежно від конкретних вимог до перетворювача. Порівняльний аналіз вхідних показників регулятора висвітлив загальні положення, якими слід керуватись при виборі способу.

1. Зростання ємнісної складової у навантаженні за будь-якого способу збільшує спотворення струму мережі. Найменші спотворення створює регулювання кутом вимикання тиристорів, тому цей спосіб можна ефективно використовувати для регулювання напруги на активно-ємнісних навантаженнях.

2. Найбільша точність регулювання першої гармоніки вихідної напруги досягається за лінійно-фазового способу, оскільки у такому випадку напруга лінійно залежить від кута регулювання.

3. Змінювати реактивну потужність регулятора у широких межах і переводити його реакцію з ємнісної в індуктивну можна шляхом регулювання кута ввімкнення тиристорів або лінійно-фазовим регулюванням. В останньому випадку для поліпшення коефіцієнта потужності постає необхідність підключення вхідних фільтрів.

На даний час фазові способи регулювання ефективно використовуються у комплексі з високочастотним регулюванням.

#### **Перелік посилань**

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 1993. – 216 с.

2. Голубев В.В., Чуприна Л.В. Энергетические характеристики импульсного преобразователя переменного напряжения с активно-индуктивной нагрузкой. – Киев, 2003. – 50 с. – (препр./ НАН Украины. Институт электродинамики; №744).

3. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 2014. – 247 с.