

УДК 621.316

Грицюк Ю.В., к.т.н.

Грицюк І.В., к.т.н.

Здолбівський А.П.

Луцький національний технічний університет

## ВПЛИВ СПЕЦИФІЧНИХ ЖИВЛЯЧИХ НАПРУГ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Здолбівський А.П. Вплив специфічних живлячих напруг на ефективність роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності. Стаття містить ґрунтовний аналіз енергетичних процесів в тиристорних компенсаторах реактивної потужності при їх живленні напругами спеціальної форми; зокрема проведений розрахунок реактивної потужності, і коефіцієнта спотворення для випадку живлення тиристорного компенсатора амплітудно-модульованою напругою від джерела обмеженої потужності, а також зроблені відповідні висновки та окреслені можливості подальших досліджень в даному напрямку.

**Ключові слова:** бітиристорний ключ, модуляція напруги, біфуркація, кут керування, реактивна потужність.

### Рис. 2. Форм. 17 Літ. 7.

Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Здолбівський А.П. Влияние специфических питающих напряжений на эффективность работы статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности. Статья содержит подробный анализ энергетических процессов в тиристорных компенсаторах реактивной мощности при их питании напряжениями специальной формы; в частности проведен расчет реактивной мощности, и коэффициента искажения для случая питания тиристорного компенсатора амплитудно-модулированной напряжением от источника ограниченной мощности, а также сделаны соответствующие выводы и намечены возможности дальнейших исследований в данном направлении.

**Ключевые слова:** битиристорный ключ, модуляция напряжения, бифуркация, угол управления, реактивная мощность.

Hrytsiuk Yu., Hrytsiuk I., Zdobitsky A. Influence of specific supply voltages on the performance of static thyristor reactive power compensators. The article contains a detailed analysis of energy processes in the thyristor reactive power compensator in their supply voltage of special shape; in particular calculated reactive power and distortion factor for the case of power thyristor compensator amplitude-modulated voltage from the source of limited power, as well as the corresponding conclusions and identified opportunities for further research in this direction.

**Keywords:** bithyristor key modulation voltage, bifurcation, angle control, reactive power.

**Постановка наукової проблеми.** Більшість регульованих статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності (СТК) працює за принципом введення в мережу регульованого паралельного реактивного опору, яке здійснюється шляхом ввімкнення або вимкнення конденсаторів чи реакторів. Застосовуючи відповідне керування тиристорами, можна плавно регулювати реактивну потужність від найбільшої ємнісної до найбільшої індуктивної для даної напруги мережі.

Властивості та робочі характеристики сучасних СТК реактивної потужності визначаються принципом дії тиристорних пристроїв, які лежать в їх основі, а саме, тиристорно-регульованих реакторів й тиристорно-кутованих конденсаторів.

Проблема компенсації реактивної потужності є досить актуальною, особливо у разі наявності в системі електропостачання різкозмінних, несиметричних та нелінійних навантажень. Це стосується підприємств, де наявні прокатні стани, дугові сталеплавильні печі та інші потужні установки з високим рівнем споживання реактивної потужності та нестабільною динамікою споживання електроенергії. Такий характер навантаження призводить до коливань напруги і її відхилень від номінального значення, а також до спотворення синусоїдності кривої напруги. Як результат – збільшення втрат електричної енергії.

Завдяки своїм характеристикам саме СТК, як пристрої динамічної компенсації реактивної потужності, застосовуються в електричних мережах промислових підприємств з метою ліквідації негативних впливів специфічного навантаження.

**Аналіз досліджень.** Спотворення синусоїдної форми напруг та струмів в промислових електричних мережах (ПЕМ) виникають через нелінійність їх структурних елементів. Це відбувається переважно через вплив вентильних пристроїв, електромагнітних апаратів та електричних машин із насиченими магнітопроводами. В роботі [1] доведено, що в загальному випадку криві напруг в ПЕМ можуть розглядатись як амплітудно-фазово-модульовані коливання

з випадковим або детермінованим законом зміни амплітуди та початкової фази. Несинусоїдність форми кривої живлячої напруги суттєво впливає на енергетичні процеси в СТК.

Як правило аналіз енергетичних процесів в СТК здійснюється за умови, що вони живляться синусоїдною напругою [2-6]. Це зумовлено або припущенням, що живлення здійснюється від мережі необмеженої потужності, або тим, що з метою зниження рівня вищих гармонік в мережі та їх впливу на роботу СТК до неї під'єднують фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП). Через те, що ФКП застосовують для компенсації вищих гармонік з найбільшими амплітудами, то вони не здатні повністю вирішити проблеми вищих гармонік, оскільки решта вищих гармонік разом можуть суттєво впливати на енергетичні процеси в СТК. Тому доцільно започаткувати використання ФКП для формування на затискачах СТК напруг живлення спеціальних форм, наприклад, амплітудно-модульованих або фазово-модульованих з детермінованими законами зміни амплітуди або фази.

Розглянемо вплив амплітудно-модульованої напруги живлення з детермінованим законом зміни амплітуди

**Формулювання цілі статті.** Визначення характеру та рівня впливу специфічних живлячих напруг на показники енергетичного процесу СТК.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** Розглянемо вплив амплітудно-модульованої напруги живлення з детермінованим законом зміни амплітуди

$$u(\theta) = U_m (1 + q \cos \theta) \sin \theta = U_m (\sin \theta + 0,5q \sin 2\theta) , \quad (1)$$

де  $\theta = \omega t$ ;  $\omega$  - колова частота;  $U_m$  - амплітудне значення напруги;  $q$  - глибина модуляції, причому  $0 \leq q \leq 2$ , та фазово-модульованої напруги живлення з детермінованим законом зміни фази

$$u(\theta) = U_m \sin(\theta + q \sin \theta) , \quad (2)$$

де глибина модуляції  $0 \leq q \leq 1$ , на інтегральні показники енергетичного процесу в СТК із заземленою нейтраллю при симетричному керуванні тиристорами бітиристорних ключів (БК) компенсатора.

Фазово-модульовану напругу живлення можна подати наступним чином

$$\begin{aligned} u(\theta) &= U_m \sin \theta \cdot \cos q \sin \theta + U_m \cos \theta \cdot \sin q \sin \theta = \\ &= U_m \sin \theta [I_0(q) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n}(q) \cos 2n\theta] + \\ &+ U_m \cos \theta \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n-1}(q) \sin(2n-1)\theta = \\ &= U_m [I_0(q) \sin \theta + \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n}(q) \sin(2n+1)\theta - \\ &- \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n}(q) \sin(2n-1)\theta + \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n-1}(q) \sin 2n\theta + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n-1}(q) \sin(2n-2)\theta] , \end{aligned} \quad (3)$$

де  $I_n(q)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  – функції Бесселя дійсної змінної  $q$ ;  $n$  – індекс цієї функції.

Відомо [7], що чим більший індекс функції Бесселя, тим ширшою є область аргументів  $q$ , при яких ця функція дуже мала. Крім того, у формулі (3) можна нехтувати всіма спектральними складовими з номерами  $n > q + 1 = 2$ .

Із врахуванням зазначених вище міркувань, співвідношення (3) можна подати наступним чином

$$\begin{aligned} u(\theta) &= U_m [I_0(q) - I_2(q)] \sin \theta + U_m [I_1(q) - I_3(q)] \sin 2\theta = \\ &= U'_m (\sin \theta + q' \sin 2\theta) , \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{де } U'_m = U_m [I_0(q) - I_2(q)], \quad q' = \frac{I_1(q) - I_3(q)}{I_0(q) - I_2(q)} .$$

Порівняльний аналіз виразів (1) і (4) свідчить про те, що фазова модуляція напруги живлення за законом (2) при  $0 \leq q \leq 1$  ізоморфна однотональній амплітудній модуляції напруги живлення за законом (1). Тому достатньо провести дослідження енергетичних процесів в СТК при його живленні амплітудно-модульованою напругою, а результати цього дослідження поширити і на СТК при його живленні фазово-модульованою напругою.

За умови ідентичності параметрів фазних реакторів струм через БК та навантаження не залежить від струмів інших фаз. Тому інтегральні показники енергетичного процесу в СТК можна визначити, розглядаючи процеси тільки в одній із фаз. Нехтуючи активним опором фазних реакторів, оскільки він значно менший реактивного, запишемо загальне рівняння рівноваги кола для СТК із заземленою нейтраллю при амплітудній модуляції напруги живлення (1):

$$\frac{di}{d\theta} = I_m (\sin \theta + 0,5q \sin 2\theta), \quad (5)$$

де  $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$  - амплітуда струму;  $L$  - індуктивність фазного реактора.

Розв'язуючи рівняння (5) при початкових умовах  $\theta = 2$ ,  $i(\alpha) = 0$ , які визначаються моментом відкриття першого тиристора БК, отримаємо закон зміни струму через фазний реактор

$$i_1(\theta) = I_m (\cos \alpha + 0,25q \cos 2\alpha - \cos \theta - 0,25q \cos 2\theta), \quad (6)$$

Перший тиристор БК СТК вимикається, коли струм  $i_1(\theta) = 0$ . Прирівнюючи до нуля праву частину виразу (6) і розв'язуючи тригонометричне рівняння, знайдемо кут вимикання першого тиристора БК:

$$\alpha_{вим1} = \begin{cases} 2\pi - \alpha, & \text{якщо } 0 \leq q \leq 1, \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \\ 2\pi - \alpha, & \text{якщо } 0 \leq q \leq 2, \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \alpha_{cp} \\ \pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right), & \\ \text{якщо } 0 \leq q \leq 2, \alpha_{cp} \leq \alpha \leq \pi - \arccos \frac{1}{q} \end{cases}, \quad (7)$$

де  $\alpha_{cp} = \arccos\left(1 - \frac{2}{q}\right)$  - граничний кут вмикання тиристора.

Аналіз співвідношення (7) свідчить про те, що коли  $0 \leq q \leq 1$ , то тривалість провідного стану першого тиристора БК становить  $2\pi - \alpha - \alpha = 2\pi - 2\alpha$ . Якщо кут керування  $\alpha$  тиристором змінюється у межах від  $\frac{\pi}{2}$  до  $\alpha_{cp}$ , то при  $0 \leq q \leq 2$  тривалість провідного стану цього тиристора буде такою, як і в попередньому випадку. Коли кут керування тиристором  $\alpha$  стає рівним  $\alpha_{cp}$  при  $0 \leq q \leq 2$ , то має місце біфуркація, при якій тривалість провідного стану тиристора стрибком зменшується до величини  $\pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right) - \alpha$ .

Розв'язуючи рівняння (5) при початкових умовах  $\theta = \pi + \alpha$ ,  $i(\pi + \alpha) = 0$ , які визначаються моментом відкриття другого тиристора БК, отримаємо закон зміни струму через фазний реактор

$$i_2(\theta) = I_m (-\cos \alpha + 0,25q \cos 2\alpha - \cos \theta - 0,25q \cos 2\theta). \quad (8)$$

Прирівнюючи до нуля праву частину виразу (8), знайдемо кут вимикання другого тиристора БК:

$$\alpha_{вим21} = 3\pi - \alpha;$$

$$\alpha_{\text{вим}22} = 2\pi - \arccos\left(-\frac{2}{q} + \cos \alpha\right).$$

Оскільки кут керування тиристором  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ , то  $\cos \alpha$  в цьому інтервалі від'ємний, і, тому при  $1 \leq q \leq 2$  аргумент арккосинуса в  $\alpha_{\text{вим}22}$  завжди за абсолютною величиною більший за одиницю і розв'язку  $\alpha_{\text{вим}22}$  не існує. Таким чином, кут вимикання другого тиристора БК  $\alpha_{\text{вим}22} = 3\pi - \alpha$  і він не залежить від глибини модуляції  $q$ . Тривалість провідного стану другого тиристора БК становить  $3\pi - \alpha - (\pi + \alpha) = 2\pi - 2\alpha$ .

Враховуючи зазначені вище особливості роботи БК СТК при його живленні амплітудно-модульованою напругою, визначимо основні інтегральні показники енергетичного процесу, а саме реактивну потужність, яку споживає компенсатор,

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \oint i du = -\frac{1}{2\pi} \int_0^T i \frac{du}{d\theta} d\theta$$

та коефіцієнт спотворення струму

$$v = \frac{I_1}{I},$$

де  $I_1$  та  $I$  – діючі значення, відповідно, першої гармоніки струму навантаження та струму навантаження.

Коли  $0 \leq q \leq 1$ , то реактивна потужність, яку споживає СТК, дорівнює

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_1 \frac{du}{d\theta} d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{3\pi-\alpha} i_2 \frac{du}{d\theta} d\theta \right),$$

де  $\frac{du}{d\theta} = U_m (\cos \theta + q \cos 2\theta)$ , а діючі значення струму першої гармоніки та струму через фазний реактор становлять відповідно

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_1 \cos \theta d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{3\pi-\alpha} i_2 \cos \theta d\theta \right), \quad (10)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_1^2 d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{3\pi-\alpha} i_2^2 d\theta \right)}. \quad (11)$$

При глибокій амплітудній модуляції напруги живлення, коли  $1 \leq q \leq 2$ , основні інтегральні показники енергетичного процесу в СТК будуть визначатись по різному залежно від того, в яких межах знаходиться кут керування тиристорами  $\alpha$ .

Коли  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{зр}} = \arccos\left(1 - \frac{2}{q}\right)$ , то реактивна потужність та діючі значення струму першої гармоніки та струму через фазний реактор визначаються за формулами (9), (10), (11).

Якщо кут керування тиристорами  $\alpha$  знаходиться в межах від  $\alpha_{\text{зр}} = \arccos\left(1 - \frac{2}{q}\right)$  до  $\alpha_{\text{вим.зр}} = \pi - \arccos\frac{1}{q}$ , то СТК споживає реактивну потужність:

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right)} i_1 \frac{du}{d\theta} d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{3\pi-\alpha} i_2 \frac{du}{d\theta} d\theta \right). \quad (12)$$

Як було зазначено вище, в цьому режимі при роботі першого тиристора БК спостерігається біфуркація, при якій тривалість провідного стану тиристора стрибком зменшується. При цьому через фазний реактор починає протікати не тільки реактивна, але й ортогональна до неї активна складова першої гармоніки струму через фазний реактор. Тому діюче значення першої гармоніки струму буде дорівнювати

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \quad (13)$$

$$\text{де } I_{1p} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \int_{\alpha}^{\pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right)} i_1 \cos \theta d\theta + \int_{\pi + \alpha}^{3\pi - \alpha} i_2 \cos \theta d\theta \right) - \text{діюче значення реактивної складової}$$

першої гармоніки, а  $I_{1a} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right)} i_1 \sin \theta d\theta$  - діюче значення активної складової першої гармоніки струму через фазний реактор.

Діюче значення струму через фазний реактор буде складати

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\pi - \arccos\left(\frac{2}{q} + \cos \alpha\right)} i_1^2 d\theta + \int_{\pi + \alpha}^{3\pi - \alpha} i_2^2 d\theta \right)}. \quad (14)$$

Коли  $\pi - \arccos\left(\frac{2}{q}\right) \leq \alpha \leq \pi$ , то основні інтегральні показники енергетичного процесу в СТК визначаються лише роботою другого тиристора БК:

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \int_{\pi + \alpha}^{3\pi - \alpha} i_2(\theta) \frac{du}{d\theta} d\theta, \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\pi + \alpha}^{3\pi - \alpha} i_2 \cos \theta d\theta, \quad (16)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi + \alpha}^{3\pi - \alpha} i_2^2 d\theta}. \quad (17)$$

У середовищі MathCAD було проведено інтегрування виразів (9)...(17). За результатами цих розрахунків на рис. 1, а, б подані залежності реактивної потужності у відносних одиницях

$Q_* = \frac{2Q}{U_m I_m}$  від кута керування тиристорами  $\alpha$  при різних  $q$ , а на рис.2 а, б - залежності

коефіцієнта спотворення струму  $\nu$ .

Через ізоморфність розглядуваних напруг живлення і на підставі аналізу залежностей на рис. 1 а, б та рис. 2 а, б можна зробити наступні спільні висновки.

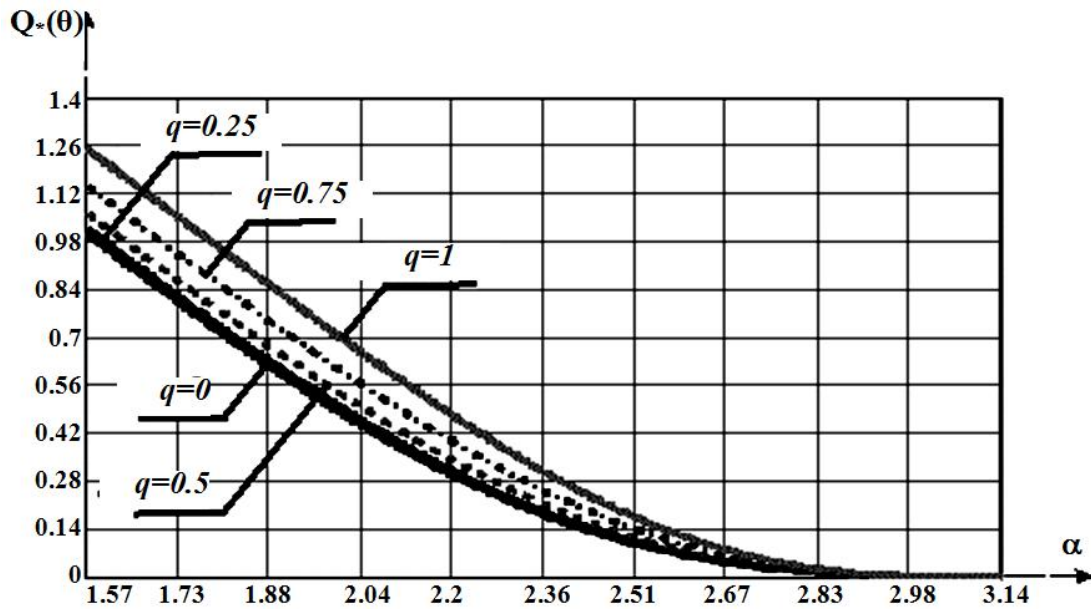
**Висновки та перспективи подальшого дослідження.**

1. У разі збільшення глибини модуляції  $q$  напруги живлення зростає величина реактивної потужності, яку споживає СТК.

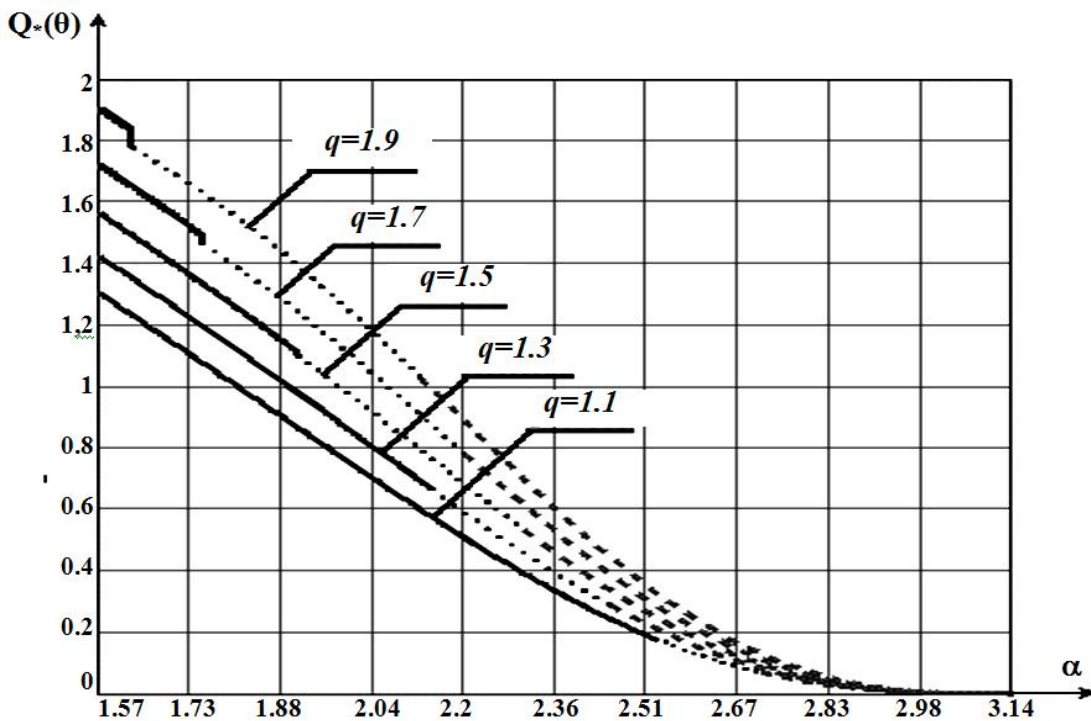
2. У разі збільшення глибини модуляції й напруги живлення зменшується величина коефіцієнта спотворення струму  $\nu$ , що викликає погіршення енергетичних показників тиристорного компенсатора реактивної потужності.

3. При глибокій модуляції напруги живлення, коли кут керування тиристорами  $\alpha$  досягає граничного значення  $\alpha_{cp}$  має місце біфуркація, завдяки якій величина реактивної потужності, яку споживає СТК, стрибком зменшується. Причому, при збільшенні глибини модуляції величина цього стрибка реактивної потужності теж зростає. Виникає новий фізичний ефект, який може бути застосований при створенні багаторежимних та багатоканальних систем керування СТК.

Подальші дослідження в напрямку вивчення енергетичних процесів в СТК можна поширити на статичні компенсатори інших видів із симетричним і несиметричним керуванням тиристорів БК та їх живленням іншими напругами спеціальних форм, наприклад амплітудно-фазово-модульованими або полігональними. Це перспективний напрям, оскільки він передбачає нетрадиційний підхід до вирішення проблем вищих гармонік.

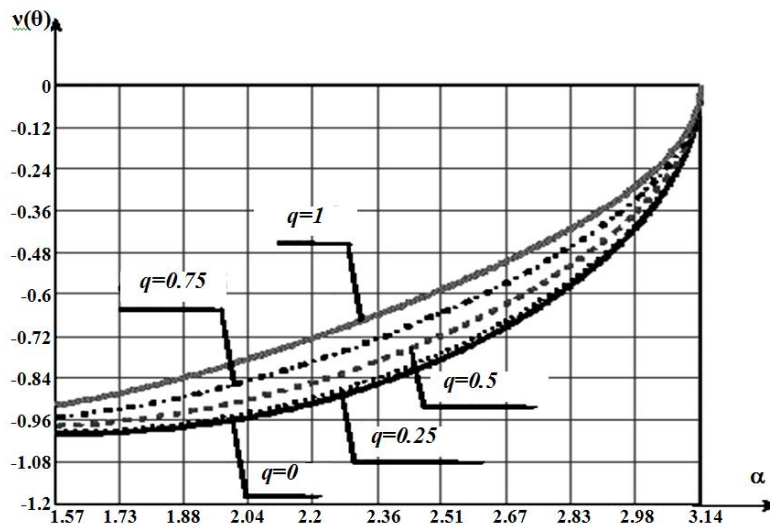


а) при  $0 \leq q \leq 1$

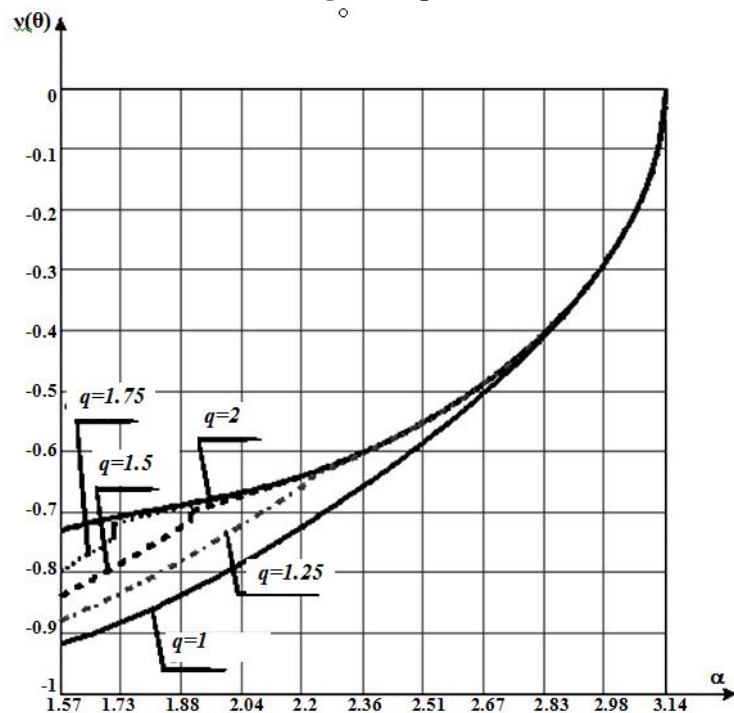


б) при  $1 \leq q \leq 2$

Рис. 1. Графіки залежності  $Q_*(\theta)$  від кута  $\alpha$ .



а) при  $0 \leq q \leq 1$



б) при  $1 \leq q \leq 2$

Рис. 2. Графіки залежності  $v(\theta)$  від кута  $\alpha$ .

### Список використаних джерел.

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чижено И.М. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности /Под. ред. Р.М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Дьюды Л. Силовая электроника в энергосистемах: статические компенсаторы реактивной мощности./ТИИЭР, т.70, №4, 1988.
5. Сегада М.С., Равлик О.М., Равлик Н.О. Математичне моделювання електромагнітних процесів в електричній мережі зі статичним тиристорним компенсатором. /Науково-технічний збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”, №69. – Дніпропетровськ: 2002.
6. Сегада М.С. Хвильові та електромагнітні процеси в електроенергетичних системах. Автореферат на здобуття наукової ступеня доктора технічних наук. – Київ, 2003.
7. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988.