

Аналіз часових залежностей струму короткозамкнутого витка, зображений на рис. 3–4, дає змогу зробити висновок про те, що вони практично не залежать від геометрії магнітного шунта.

Електромагнітний момент досягає усталеного значення через 0,5 с від початку пуску при шунті постійного перерізу (рис. 5) та через 0,6 с при шунті з “містком” насичення (рис. 6). Відповідно процес розгону при шунті з містком насичення відбувається повільніше, ніж при шунті рівномірної товщини (рис. 7).

**Висновки.** Математична модель АДЕП, розроблена на підставі зображення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою з високим рівнем деталізації магнітопроводу, дає змогу досліджувати вплив геометрії магнітного шунта на перехідні процеси в АДЕП. Виконані дослідження показали істотний вплив геометрії магнітного шунта на перебіг перехідних процесів.

1. Иванов В.В. *Магнитные шунты в двухполюсных двигателях с экранированными полюсами* // *Электротехника*. – 1980. – № 5. – С. 19–22. 2. Ефименко Е.И., Владимиров Э.В. *Расчет магнитной цепи и полей двигателя с экранированными полюсами* // *Электрические машины*. – Чебоксары, 1976. – Вып. 1. – С. 49–58. 3. Lhou D., Rajanathan C. B., Sapeluk A. T., Ozveren Q. S. *Finite – element – aided design optimization of a shaded – pole induction motor for maximum starting torque* // *IEEE Trans. Magn.* – 2000. – 36, № 5, p. 1. – P. 3551–3554. 4. Anuszczyk J., Blaszczyk P. *Obliczenia bocznika magnetycznego silnika indukcyjnego z faza zwarta* // *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*. – Katowice, 2004. – № 69. – S. 41–44. 5. Гавдьо І.Р. *Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук*. – Львів, 2005. – 17 с.

УДК 621.316.925

В.Г. Гапанович, О.І. Маврін, В.П. Олійник  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електричних станцій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДУГОВОЇ СТАЛЕТОПНОЇ ПЕЧІ

© Гапанович В.Г., Маврін О.І., Олійник В.П., 2008

**Отримано порівняльну характеристику ефективності роботи різних типів систем регулювання статичного тиристорного компенсатора, обладнаних різними давачами координат регулювання.**

**Obtained compared characteristics of work efficiency of different system types of control static thyristor compensator equipped with different transducers of control parameter.**

**Постановка проблеми.** Робота дугових сталетопних печей (ДСП) супроводжується деякими небажаними явищами, серед яких найбільш “неприємними” для системи електропостачання дугових сталетопних печей (СЕСП ДСП) є коливання напруги та несиметрія напруги, причому ці процеси мають випадковий характер. Для зменшення негативного впливу ДСП на мережі живлення застосовуються статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (СТК).

Ефективність компенсації статичним тиристорним компенсатором коливань напруги і її симетрування насамперед залежить від еквівалентного запізнювання компенсації, обумовленого дискретністю керування вітками тиристорно-реакторної групи (ТРГ) і особливістю формування

неперервних (поточних) сигналів координат регулювання системи регулювання (СР СТК) статичного тиристорного компенсатора. Запізнювання регулятора СТК залежить від прийнятого алгоритму керування й методів вимірювання координат регулювання.

**Аналіз останніх досліджень.** Порівняльних досліджень впливу різних типів СР СТК, які реалізують різні рівняння компенсації, різні методи вимірювання координат режиму ємнісної ланки СТК і використовують різні давачі координат регулювання, на ефективність компенсації коливань напруги в СЕП ДСП за останні роки не знайдено.

**Задачі досліджень.** Дослідити вплив різних алгоритмів керування, різних методів вимірювання координат режиму ємнісної ланки СТК та різних методів вимірювання координат регулювання на ефективність компенсації коливань напруги в СЕП ДСП.

**Виклад основного матеріалу.** Для розроблення оптимальної структури СР СТК необхідні рівняння компенсації, які дають змогу найпростіше, за координатами режиму навантаження, визначати координати режиму компенсатора, необхідні для симетрування і компенсації реактивної потужності навантаження. З цією метою, на основі рівнянь Штейнмеца, були виведені рівняння компенсації у різних формах запису координат регулювання [1]:

- у формі проекцій струмів навантаження на відповідні лінійні напруги

$$\begin{aligned} I_{AB}^K &= -\frac{1}{\sqrt{3}}(I_A^{CA} + I_B^{BC}); \\ I_{BC}^K &= -\frac{1}{\sqrt{3}}(I_C^{CA} + I_A^{AB}); \\ I_{CA}^K &= -\frac{1}{\sqrt{3}}(I_A^{AB} + I_C^{BC}), \end{aligned} \quad (1)$$

- у формі реактивних складових струмів навантаження

$$\begin{aligned} I_{AB}^K &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_A^i + I_B^i - I_C^i); \\ I_{BC}^K &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_B^i + I_C^i - I_A^i); \\ I_{CA}^K &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_C^i + I_A^i - I_B^i), \end{aligned} \quad (2)$$

- у формі реактивних потужностей навантаження

$$\begin{aligned} Q_{AB}^K &= Q_A + Q_B - Q_C; \\ Q_{BC}^K &= Q_B + Q_C - Q_A; \\ Q_{CA}^K &= Q_C + Q_A - Q_B. \end{aligned} \quad (3)$$

Реєстрація проекцій струмів в рівнянні (1), чи реактивних складових струмів в рівнянні (2) залежно від прийнятого методу вимірювання координат регулювання здійснюється вимірюванням миттєвого значення фазного струму навантаження в момент максимуму відповідної лінійної напруги (точковий метод) чи інтегруванні кривої струму навантаження протягом половини періоду відповідної лінійної напруги (інтегральний метод). Реєстрація реактивних потужностей у рівнянні (3) виконується перемноженням миттєвих значень фазного струму навантаження та відповідної лінійної напруги (метод перемноження) з подальшою компенсацією постійної складової інтегральним методом [1, 2].

Отже, за допомогою СТК, проблеми компенсації коливань напруги і її симетрування можна вирішувати одночасно, на підставі одного закону регулювання (рівняння компенсації), наприклад (1), (2), (3).

Найскладнішою задачею, яка виникає під час розроблення СР СТК, є створення швидкодіючих заводозахисених давачів координат регулювання (ДКР), які залежно від прийнятого для побудови алгоритму керування рівняння компенсації (1)–(3) повинні забезпечити вимірювання

відповідної координати регулювання. Швидкодія та заводо захищеність ДКР, під якою розуміють точність вимірювання основної гармоніки струму для рівнянь (1)–(2), чи постійної складової для рівняння (3), залежать від методу вимірювання координати регулювання, закладеного в їх конструкцію. Для реєстрації координат регулювання (КР) в СР СТК запропоновано використати такі принципово відмінні методи вимірювання: точковий метод, інтегральний метод, метод перемноження. Всі три методи вимірювання КР реалізовані у вигляді дослідних взірців ДКР – давача миттєвого струму (ДМС), давача інтегрального струму (ДІС) і давача реактивної потужності (ДРП) [2]. Аналіз заводо захищеності запропонованих ДКР показав, що найбільше заводо захищеним є давач інтегрального струму [3].

Статичний тиристорний компенсатор складається з керованої індуктивної ланки і некерованої ємнісної ланки. Вимірювання параметрів режиму ємнісної ланки можливе двома методами, які надалі визначатимуть структуру СР СТК. Перший з них ґрунтується на непряму вимірюванні параметрів режиму ємнісної ланки через напругу в точці під'єднання ємнісної ланки та її еквівалентний опір. Другий ґрунтується на заміні в алгоритмі керування окремо виміряних координат режиму навантаження і ємнісної ланки компенсатора координатами режиму, які вимірюються на вводі системи “навантаження – СТК”.

Залежно від методу вимірювання режиму ємнісної ланки СТК (в назві СР СТК перша цифра позначає 1 – непряме вимірювання за схемою рис. 1; 2 – компенсація і симетрування реактивної складової навантаження здійснюється за струмом вводу системи “навантаження – СТК” за схемою (рис. 2); реалізації рівняння компенсації (в назві СР СТК друга цифра позначає рівняння компенсації) та типу давачів координат регулювання (ДМС – давачі миттєвого струму, ДІС – давачі інтегрального струму, ДРП – давачі реактивної потужності, компенсація складових подвоєної частоти в цих давачах здійснюється інтегральним методом) запропоновані такі СР СТК:

- |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| 1) СР-1-2-ДМС; | 4) СР-1-1-ДІС; | 7) СР-2-3-ДРП. |
| 2) СР-1-2-ДІС; | 5) СР-2-2-ДМС; |                |
| 3) СР-1-3-ДРП; | 6) СР-2-2-ДІС; |                |

Дослідження ефективності запропонованих регуляторів виконували на машинних моделях, які повністю відображали внутрішню структуру мережі, навантаження, силову частину СТК, структурні схеми як його регулятора, так і давачів координат регулювання [4].

На рис. 1 і 2 показані структурні схеми розроблених СР СТК, які реалізують різні рівняння компенсації, різні методи вимірювання координат режиму ємнісної ланки СТК і використовують різні давачі координат регулювання.

Стратегія досліджень ефективності зменшення коливань напруги на шинах 35 кВ СЕП ДСП СТК обладнаного різними типами регуляторів була така. Математичні експерименти виконували для спрощеної схеми СЕП ДСП (рис. 1, а), до складу якої входив СТК, обладнаний різними типами розроблених регуляторів (рис. 1, б; 2). Повна схема СЕП ДСП наведена в [5]. Прийняте спрощення схеми СЕП ДСП є коректним, тому що метою експериментів було дослідження динамічних характеристик СТК загалом, а також силову частину та його систему регулювання.

ДСП моделювалася швидкозмінним навантаженням фаз АВ і ВС, що дозволило відобразити несиметричні режими роботи СЕП ДСП. Під час експериментів аналізували коливання напруги на шинах 35 кВ за відсутності СТК. Коливання струму кожної з фаз навантаження моделювали за допомогою модуляції активного опору навантаження з частотами модуляції 2, 4, 10, 12, 16, 24 Гц і різницею фаз модуляції, що дорівнює 90 ел. град. (або без неї) на кожній з частот. Глибина модуляції становила 100 %. Оскільки при тому збуджувалися коливання напруги в схемі і на інших частотах, для забезпечення точності вимірювання коливань напруги на шинах здійснювалося однопівперіодне випростування напруги на шинах з подальшим гармонійним аналізом цієї напруги розкладанням в ряд Фур'є відносно базової частоти 2 Гц. Такий підхід дозволив окремо реєструвати коливання напруги для кожної з частот модуляції. Аналіз коливань напруги здійснювали для всіх фаз, після чого були отримані усереднені по всіх трьох фазах характеристики коливань. Для цього ж закону зміни навантаження було вивчено режими роботи розроблених регуляторів СТК.

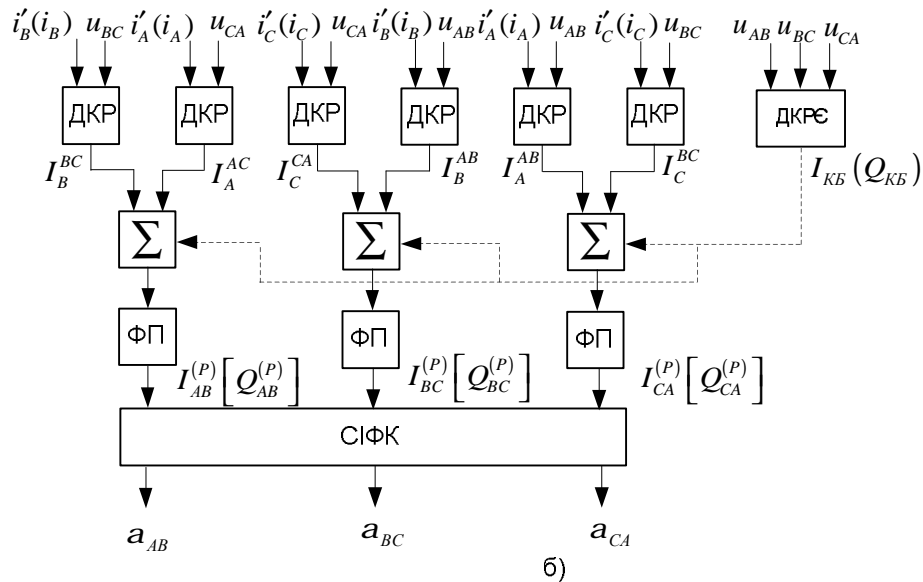
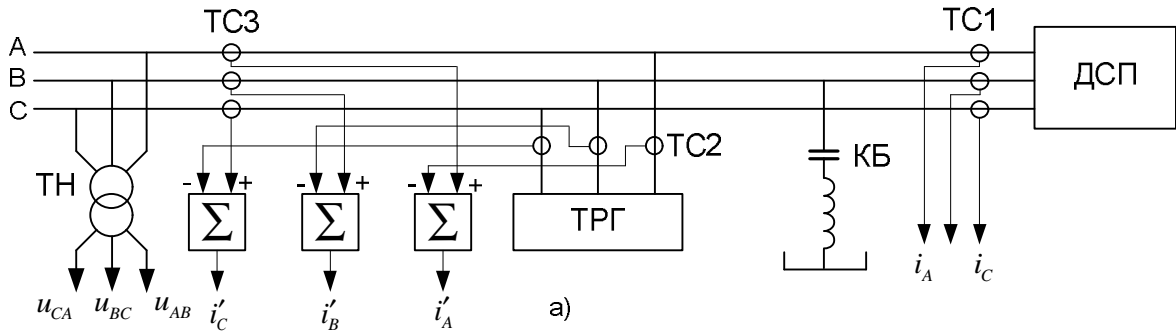


Рис. 1. Структурна схема СР СТК, яка реалізує рівняння компенсації (1)  
 ДКРЄ – давач координати режиму ємнісної ланки; ДКР – давач координати регулювання;  
 ФП – функційний перетворювач; СІФК – система імпульсно-фазового керування

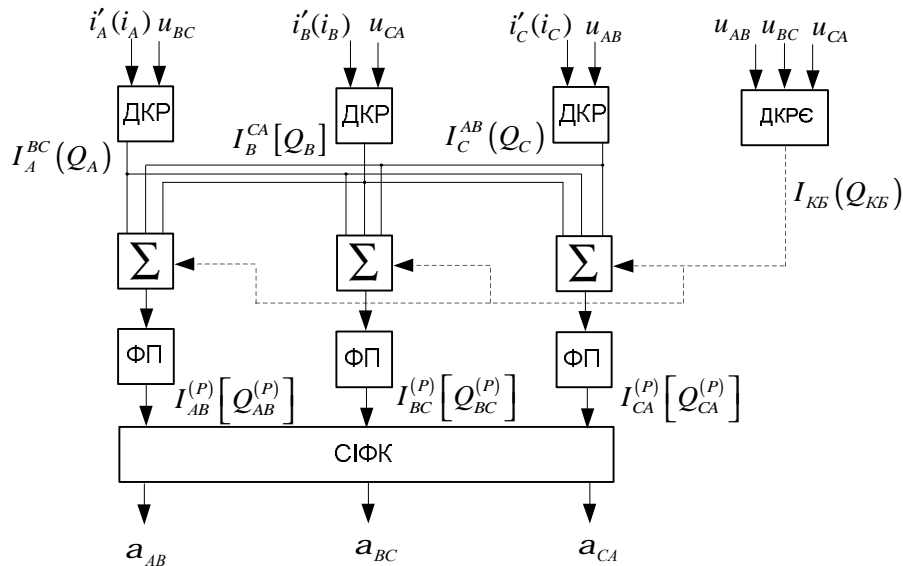


Рис. 2. Структурна схема СР СТК, яка реалізує рівняння компенсації (2).  
 У квадратних дужках наведені величини, що відповідають реалізації рівняння (3).  
 Пунктиром показані структури СР СТК, що реалізують непрямий метод вимірювання параметрів режиму ємнісної ланки СТК. У круглих дужках наведені струми (рис. 1, а), що відповідають непрямому методу вимірювання

Отримані результати дали змогу побудувати залежності, що характеризують ефективність зниження коливань напруги за допомогою різних регуляторів СТК.

За вихідний режим був прийнятий режим коливань напруги на шинах 35 кВ СЕП ДСП у разі вимкненого СТК. Коливання напруги відповідної частоти створювались модуляцією навантаження частотами 2, 4, 10, 12, 16 і 24 Гц. Величина коливань напруги для кожної із частот модуляції в цьому режимі була прийнята такою, що дорівнює 100 %.

Стосовно цього режиму, для різних типів регуляторів СТК отримані залишкові значення коливань напруги на шинах для всіх трьох фаз. Дані по трьох фазах усереднювали, у результаті були отримані середні залишкові коливання напруги на різних частотах модуляції, які є динамічними характеристиками СТК, обладнаного різними типами регуляторів. Під час математичних експериментів проводились дослідження ефективності компенсації коливань напруги регуляторами СР-2-2-ДІС і СР-2-3-ДРП, що мають у своїй структурі додатковий контур стабілізації по постійній складовій з оптимальним коефіцієнтом передачі ( $K_p$ ), що дорівнює 0,4 [5]. Дослідженнями встановлено, що наявність контуру стабілізації збільшує залишкові значення коливань напруги, що особливо помітно на вищих частотах модуляції. Для наочного порівняння отримані результати були апроксимовані методом найменших квадратів.

На рис. 3 показані порівняльні частотні характеристики СТК з регуляторами, побудованими за першою структурою (непряме вимірювання, алгоритми керування на базі рівнянь (2) і (3), і обладнаних різними давачами координат регулювання: давачами миттєвого струму (ДМС); давачами інтегральними струму (ДІС) і давачами реактивної потужності (ДРП). Для порівняння регуляторів, що мають різні закони формування вихідного сигналу: по трьох проекціях – рівняння (2), або по двох проекціях – рівняння 1, і обладнаних давачами координат регулювання одного типу – ДІС, були побудовані залежності, показані на рис. 4. Для порівняння регуляторів, побудованих за різними структурами вимірювання координат режиму емнісної ланки, але обладнаних давачами координат регулювання одного типу, наприклад, ДРП, були побудовані залежності, показані на рис. 5.

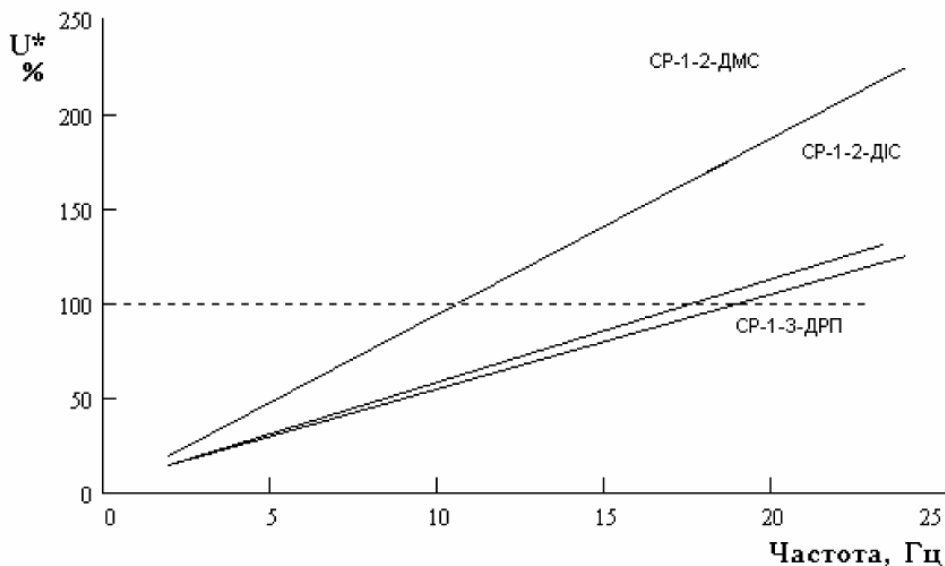


Рис. 3. Ефективність компенсації коливань напруги СТК з регуляторами типу СР-1-2-ДМС, СР-1-2-ДІС, СР-1-3-ДРП. ( $U^*$  – залишкові значення коливань напруги на шинах, %;  $U^* = 100\%$  – рівень коливань напруги на шинах, за відсутності СТК)

Під час виконання досліджень були виявлені деякі особливості регуляторів, побудованих за другою структурою. У разі застосування давачів координат регулювання низької точності (наприклад, ДМС), навіть під час введення додаткового контуру стабілізації за постійною складовою, не вдається досягти ефекту компенсації коливань напруги. Навпаки, підключення СТК

із таким регулятором (СР-2-2-ДМС) значно підвищує рівень коливань напруги на шинах. Навіть без зміни навантаження СТК починає “розгойдувати” систему. Застосування давачів координат регулювання інших типів (ДІС, ДРП) знімає проблему стійкості для регуляторів, побудованих за другою структурою. Регулятори, побудовані за другою структурою, мають значно гірші динамічні характеристики, порівняно з регуляторами, побудованими за першою структурою, які ще більше погіршуються за наявності контуру стабілізації по постійній складовій та збільшенні його коефіцієнта передачі Кп.

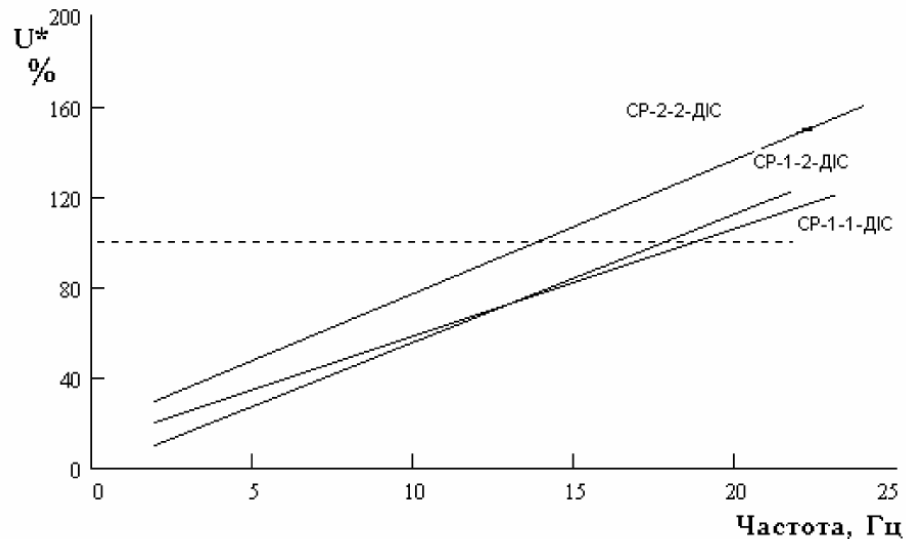


Рис. 4. Ефективність компенсації коливань напруги СТК з регуляторами типу СР-1-2-ДІС, СР-1-1-ДІС, СР-2-2-ДІС

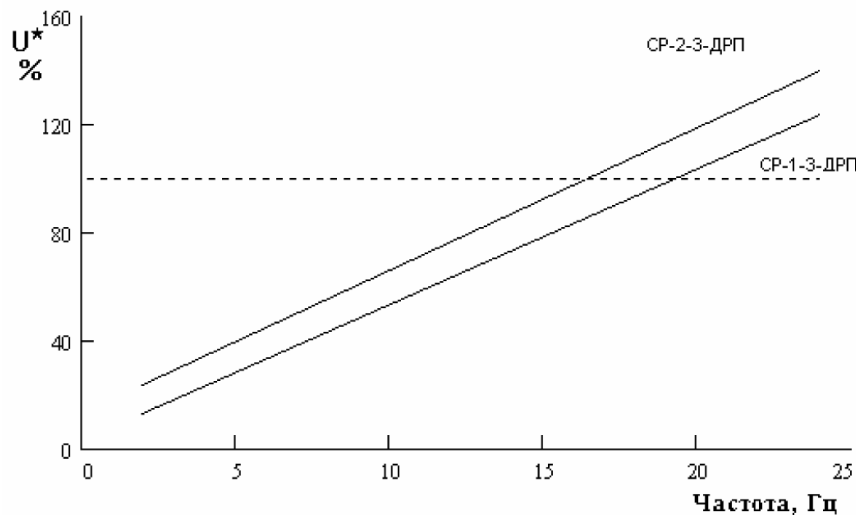


Рис. 5. Ефективність компенсації коливань напруги СТК з регуляторами, побудованими за різними структурами вимірювання координат ємнісної ланки і обладнаних давачами координат регулювання одного типу – ДРП

**Висновки.** Результати досліджень показали, що давачі миттєвого струму дуже чутливі до спотворень форми кривої струму, який вимірюється. У разі застосування цих давачів у регуляторах другої структури неможливо забезпечити стійкість регулювання за будь-яких значень Кп. Регулятори, які реалізують рівняння (1) і (2) практично однакові з погляду ефективності зменшення коливань напруги, однак регулятор, що використовує рівняння (1) вимагає в два рази більше ДКР.

Регулятори, побудовані за другою структурою, характеризуються взагалі нижчими показниками ефективності зменшення коливань напруги порівняно з регуляторами першої структури.

1. Варецький Ю.Е., Кенс Ю.А., Гапанович В.Г. Быстродействующая фазная компенсация несимметричных нагрузок статическими компенсаторами // Техническая электродинамика. – К.: Наук. думка, 1987. – № 3. – С. 51–57. 2. Варецький Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Датчики параметров регулирования статических тиристорных компенсаторов // Вестн. Львов. политехн. ин-та. – 1986. – № 204. – С. 10. 3. Варецький Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А. Помехоустойчивость быстродействующих датчиков для регуляторов статических компенсаторов // Техническая электродинамика. – К.: Наук. думка, 1987. – № 4. – С. 95–99. 4. Равлик О.М., Гречин Т.М., Лисяк Г.М. Программный комплекс для дослідження електротехнічних систем // Тез. доп. 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці”. – Львів, 1995. – С.79. 5. Гапанович В.Г., Маврін О.І., Олійник В.П., Равлик О.М. Дослідження впливу додаткового контуру стабілізації за постійною складовою на динамічні показники статичного тиристорного компенсатора // Електроенергетичні і електромеханічні системи. – 2006. – № 563.

УДК 62-83:621.313.3

Б.Л. Карплюк, Л.Ф.Карплюк, Б.Я. Панченко  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## ВИБІР ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ НАВАНТАЖЕННЯ З КРИВОШИПНО-ШАТУННИМ МЕХАНІЗМОМ

© Карплюк Б.Л., Карплюк Л.Ф., Панченко Б.Я., 2008

**Проаналізовано роботу системи керування частотно-керованим електроприводом кривошипно-шатунного механізму. Розроблено методику налаштування контуру регулювання швидкості. Результати досліджень можна використовувати під час розроблення нових систем електроприводів**

**The control system of electric drives with Crankshaft mechanism load has been analyzed. Method of tuning speed feedback adjusting was developed. The result can be used for the designing new systems of electric drives.**

**Постановка задачі.** Встановлення сучасних систем електропривода дає змогу отримати високі енергоекономічні та масо-габаритні показники. Особливий інтерес становить встановлення сучасних електроприводів на механізми з циклічно-змінними в функції кута повороту моментами інерції. До таких механізмів належить машини з кривошипно-шатунними або ексцентриковими механізмами: лісопилільні рами, стругальні верстати. Проте, як показав досвід експлуатації, впровадження тут нових перспективних з погляду енергозбереження систем електропривода не завжди дозволяє отримати сподіваний результат. Одним з напрямків забезпечення ефективності є правильний вибір параметрів системи автоматичного регулювання

**Аналіз останніх досягнень.** Механізми зі змінним моментом інерції створюють змінне навантаження для електропривода і тому, з метою зменшення потужності привідного двигуна мають великий момент інерції, або комплектуються механізмами нагромадження кінетичної енергії – маховиками. Необхідною вимогою є регулювання швидкості, тому тут традиційно застосовують