СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

УДК 629.735.051-52(045)

О. К. Аблесімов, проф.,
С. В. Пахомов,
П. В. Погонець

КОНТУРИ ПІДСУМОВУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iacs@nau.edu.ua

Розглянуто можливості використання різних типів контурів підсумовування в системах автоматичного керування.

Ключові слова: контур підсумовування, система автоматичного керування, потенціометр, датчики швидкості і кута, стабілізувальний момент, амплітуда, фаза.

Вступ і постановка завдання. Контури підсумовування є функціонально необхідними елементами систем автоматичного керування (САК). Вони призначені для підсумовування сигналів, пропорційних відхиленням і швидкостям відхилення об'єкта керування.

На практиці контури підсумовування виконуються як на резисторах, так і на підсумкових підсилювачах (рис. 1).

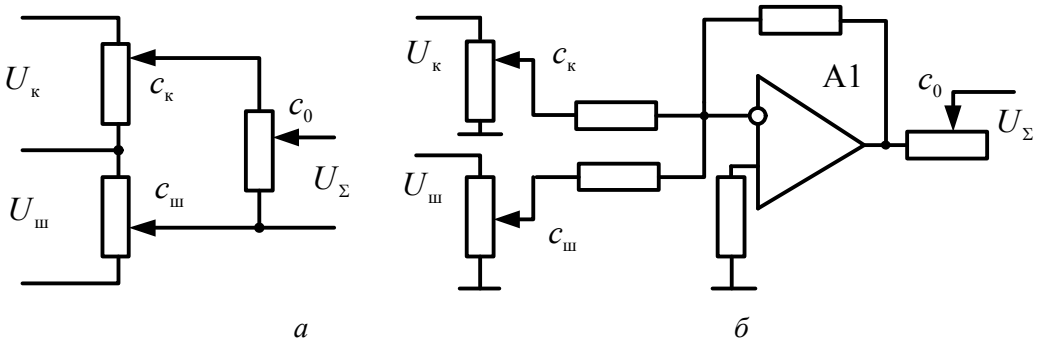

Рис. 1. Контури підсумовування: *а* – на резисторах; *б* – на підсумовувальному підсилювачі

Структурну схему контуру показано на рис. 2.

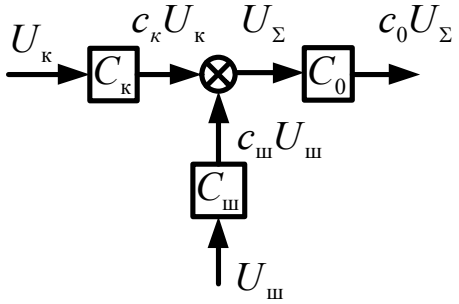

Рис. 2. Структурна схема контуру підсумовування

Тут $0 < c_к < 1$, $0 < c_Ш < 1$, $0 < c_0 < 1$ – передатні коефіцієнти потенціометрів, що залежать від положення їх рухомих контактів; $U_к$ – сигнал, пропорційний, наприклад, кутовому відхиленню об'єкта керування; $U_Ш$ – сигнал, пропорційний швидкості кутового відхилення об'єкта керування; $U_Σ$ – сумарний сигнал.

Момент $M_с$, який стабілізує об'єкт керування, у разі дії на нього зовнішніх збурень, формується за двома каналами: каналом датчика відхилення об'єкта керування і каналом датчика швидкості відхилення об'єкта керування. Структурна схема САК з розділеними каналами формування моментів від кожного з керувальних сигналів показано на рис. 3.

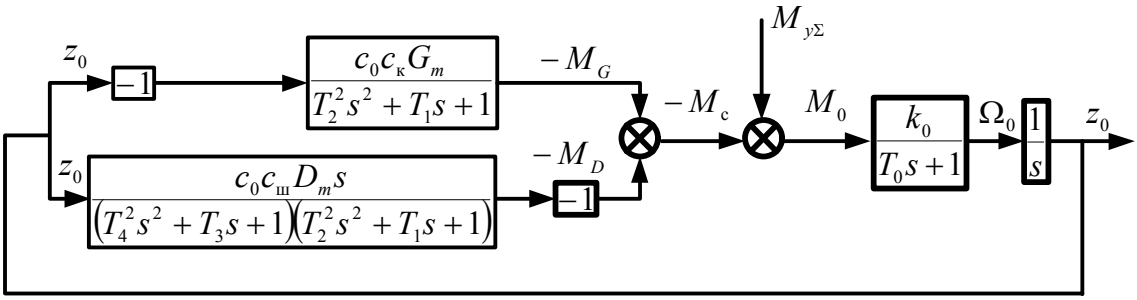

Рис. 3. Структурна схема типової САК з поділом моментів, що діють на об'єкт керування

Аналіз структурної схеми показує, що стабілізувальний момент можна подати у вигляді векторної суми двох складових:

$$\overline{M}_с = \overline{M}_G + \overline{M}_D,$$

де $M_G \equiv c_0 c_к U_к$ – складова, пропорційна жорсткості системи; $M_D \equiv c_0 c_ш U_ш$ – складова, пропорційна демпфіруванню системи.

Таким чином, змінюючи за допомогою потенціометрів c_0 ,$c_к$,$c_ш$ контуру підсумовування сигнали датчиків, можна змінювати момент стабілізації, тобто настроювати (регулювати) систему, і задіювати всі три потенціометри. Однак для спрощення технології налаштування конструктори залишають у контурах підсумовування не більше двох регульованих потенціометрів. Найбільше на практиці поширені контури $c_0 - c_ш$, $c_0 - c_к$, $c_к - c_ш$.

Чи позначиться зміна типу контуру підсумовування на вирішенні основного завдання експлуатаційного регулювання САК – формуванні стабілізувального моменту, що найповніше компенсує зовнішні збурювання, що діють на об'єкт керування?

Вирішення завдання. Розглянемо докладніше формування стабілізувального моменту залежно від зміни регульованих параметрів системи. Найбільш наочне формування стабілізувального моменту можна показати, вважаючи, що сумарний збурювальний момент змінюється за гармонічним законом:

$$M_{y\Sigma}(t) = M_{y\Sigma m} \sin \omega t .$$

Для цього випадку можна для якої-небудь постійної частоти побудувати векторну діаграму моментів, показану на рис. 4.

На векторній діаграмі за початок відліку фазових кутів взято напрямок вектора M_0 результуючого моменту, що діє на об'єкт керування. Якщо знехтувати інерційністю об'єкта керування, то вектор його абсолютної кутової швидкості Ω_0 буде збігатися з напрямком вектора M_0. Вісь переміщень z_0 об'єкта керування зміщена відносно вектора його абсолютної кутової швидкості на кут $-\frac{\pi}{2}$. Це відповідає наявності в структурі системи ідеальної інтегрувальної ланки. Вектор M_G збігається за фазою з лінією переміщень за умови нехтування інерційністю виконавчих

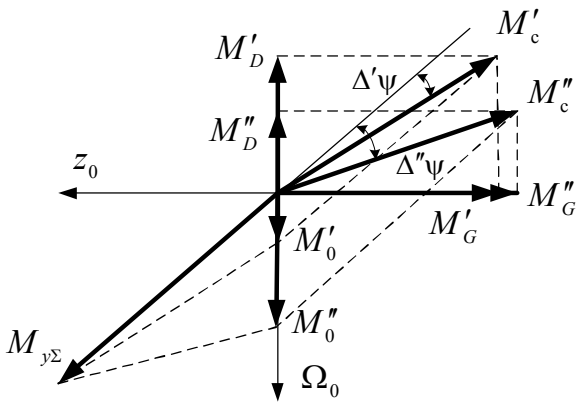

Рис. 4. Векторна діаграма моментів САК для випадку $M_{y\Sigma} = M_{y\Sigma m} \sin \omega t$

пристроїв системи. Вектор M_D збігається за фазою з вектором абсолютної кутової швидкості Ω_0. Оскільки моменти M_G і M_D формуються в ланцюгах негативних зворотних зв'язків САК, то на векторній діаграмі їхні фази змінені на 180°. Момент стабілізації $M_{\text{с}}$ визначається векторною сумою моментів M_G і M_D.

На наведеній векторній діаграмі (рис. 4) стабілізувальний момент $M''_{\text{с}}$ не повністю компенсує зовнішні збурювання $M_{y\Sigma}$. Це зумовлено тим, що амплітуди моментів $M''_{\text{с}}$ і $M_{y\Sigma}$ не однакові, а фазовий зсув між ними відрізняється від 180°. Як наслідок результуючий момент M''_0 відносно великий і відповідні йому відхилення об'єкта керування від заданого напрямку – теж великі.

Для зменшення похибок необхідно відрегулювати систему. Варто так змінити амплітуду й фазу стабілізувального моменту, щоб забезпечувалася більш повна компенсація зовнішніх збурювань. На рис. 4 показано, що, змінюючи значення передатних коефіцієнтів потенціометрів контуру підсумовування, можна зменшити складову стабілізувального моменту M''_G до значення, наприклад, M'_G, а складову M''_D – збільшити до рівня M'_D. Унаслідок такого регулювання маємо $M'_0 < M''_0$, тобто точність компенсації збурювального моменту підвищується.

Розглянемо можливості контурів підсумовування щодо змінювання амплітуди й фази стабілізувального моменту, тобто забезпечення в кінцевому підсумку оптимальності налаштування САК.

Контур підсумовування $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$ показано на рис. 5. За його допомогою регулюються сигнали датчика кута (ДК) – потенціометр $c_{\text{к}}$, і датчика швидкості (ДШ) – потенціометр $c_{\text{ш}}$. Коефіцієнт $c_0 = 1$ при цьому залишається постійним.

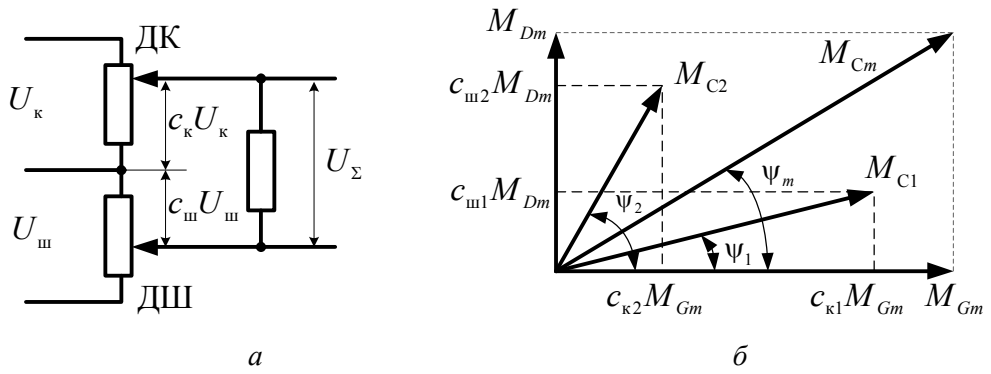

Рис. 5. Контур підсумовування $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$: *а* – схемне рішення; *б* – векторна діаграма

Переміщенням рухомих контактів потенціометрів $c_{\text{к}}$,$c_{\text{ш}}$ регулюються складові стабілізувального моменту

$$M_G = c_{\text{к}} M_{Gm} \equiv c_{\text{к}} U_{\text{к}} \quad \text{і} \quad M_D = c_{\text{ш}} M_{Dm} \equiv c_{\text{ш}} U_{\text{ш}},$$

де M_{Gm} і M_{Dm} – модульні значення складових, обумовлені конструктивними жорсткістю G_m й демпфіруванням D_m системи відповідно.

Амплітуду $M_{\text{с}}$ й фазу ψ стабілізувального моменту знаходимо за формулами:

$$M_{\text{с}} = \sqrt{c_{\text{к}}^2 M_{Gm}^2 + c_{\text{ш}}^2 M_{Dm}^2};$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{c_{\text{ш}} M_{Dm}}{c_{\text{к}} M_{Gm}}.$$

На підставі отриманих даних будуємо векторну діаграму контуру (рис. 5, *б*). Аналіз діаграми показує, що вектор $\overline{M}_{\text{с}}$ стабілізувального моменту залежно від значень регулювальних коефіцієнтів може займати будь-яке положення в паралелограмі $OM_{Dm}M_{\text{с}m}M_{Dm}$. Його амплітуду можна змінювати від нуля (якщо $c_{\text{к}} = 0,\ c_{\text{ш}} = 0$) до максимального значення $M_{\text{с}m}$ (якщо $c_{\text{к}} = 1,\ c_{\text{ш}} = 1$), а фазовий кут ψ – від нуля (якщо $c_{\text{к}} \neq 0,\ c_{\text{ш}} = 0$) до 90° (якщо $c_{\text{к}} = 0,\ c_{\text{ш}} \neq 0$).

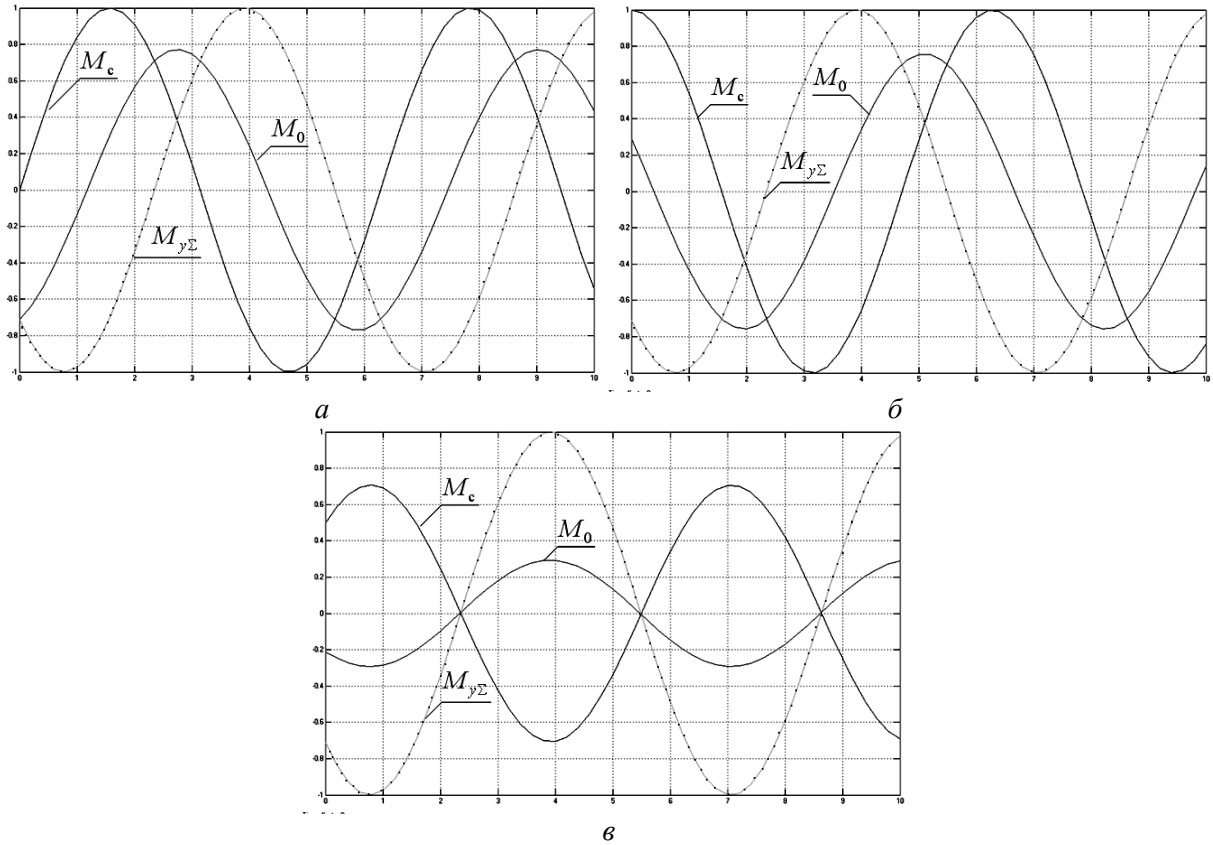

Рис. 6. Часові діаграми контуру $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$: *а* – $c_{\text{к}} = 1;\ c_{\text{ш}} = 0$; *б* – $c_{\text{к}} = 0, c_{\text{ш}} = 1$; *в* – $c_{\text{к}} = 0{,}5;\ c_{\text{ш}} = 0{,}5$

Часові діаграми розглянутого контуру показано на рис. 6. Аналіз діаграм підтверджує зроблені висновки.

Контур підсумовування $c_{\text{к}} - c_0$ (рис. 7) забезпечує регулювання сигналу датчика кута (ДК) за рахунок зміни передатного коефіцієнта $c_{\text{к}}$ і загального сигналу (ЗАГ) датчиків кута й швидкості за рахунок зміни передатного коефіцієнта c_0.

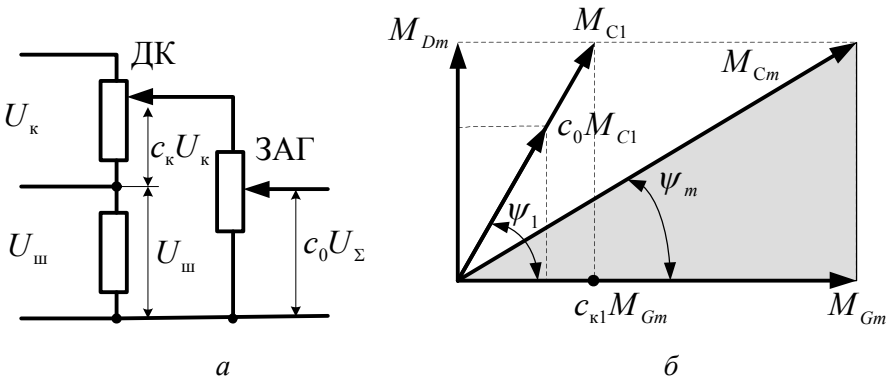

Рис. 7. Контур підсумовування $c_{\text{к}} - c_0$: *а* – схемне рішення; *б* – векторна діаграма

Аналіз векторної діаграми показує, що даний контур підсумовування дозволяє змінювати амплітуду стабілізувального моменту $M_{\text{с}} = c_0\sqrt{c_{\text{к}}^2 M_{Gm}^2 + M_{Dm}^2}$ у діапазоні від $M_{\text{с}} = 0$, якщо $c_0 = 0$, до максимального значення $M_{\text{с}\,m}$, якщо $c_{\text{к}} = 1$, $c_0 = 1$.

Фаза стабілізувального моменту $\psi = \text{arctg}\dfrac{M_{Dm}}{c_{\text{к}} M_{Gm}}$ змінюється від значення ψ_m, якщо $c_{\text{к}} = 1$, до $\psi = 90°$, якщо $c_{\text{к}} = 0$.

Таким чином, розглянутий контур забезпечує більш вузький діапазон зміни фази стабілізувального моменту порівняно з контуром $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$.

Контур підсумовування $c_{\text{ш}} - c_0$. Регулювання сигналу датчика швидкості (ДШ) і загального (ЗАГ) сигналу датчиків кута й швидкості дозволяє виконати контур, показаний на схемі, яку наведено на рис. 8, *а*.

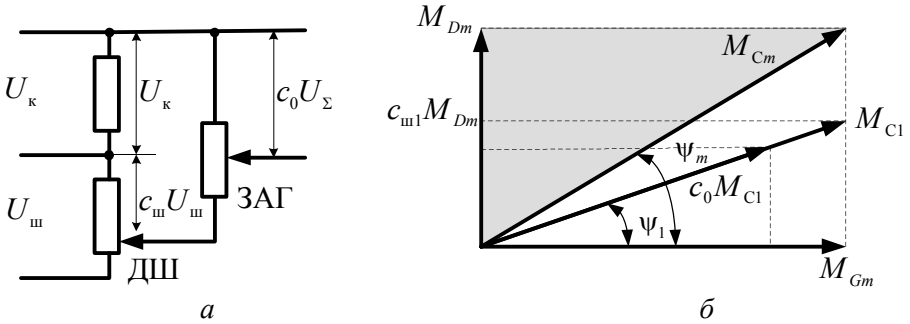

Рис. 8. Контур підсумовування $c_{\text{ш}} - c_0$: *а* – схемне рішення; *б* – векторна діаграма

Застосування цього контуру дозволяє варіювати амплітудою стабілізувального моменту $M_{\text{с}} = c_0\sqrt{M_{Gm}^2 + c_{\text{ш}}^2 M_{Dm}^2}$ від нуля, якщо $c_0 = 0$, до значення $M_{\text{с}\,m}$, якщо $c_{\text{ш}} = 1$, $c_0 = 1$. Діапазон регулювання фази $\psi = \text{arctg}\dfrac{c_{\text{ш}} M_{Dm}}{M_{Gm}}$ стабілізувального моменту дорівнює $0 - \psi_m$, якщо $c_{\text{ш}} = 0 - 1$, відповідно. Він досить обмежений, особливо, якщо $M_{Dm} << M_{Gm}$.

Контур підсумовування c_0. Датчики кута й швидкості неминуче мають власні помилки. Заміна одного з датчиків інтегральною статичною схемою дозволяє підвищити точність САК у цілому. Наприклад, сигнал, пропорційний швидкості відхилення об'єкта керування, може бути отриманий диференціюванням сигналу датчика відхилення.

Підсумовуючи сигнал датчика кута $U_{\text{к}}$ й отриманий диференціюванням сигнал $U_{\text{ш}}$, пропорційний швидкості, маємо класичний сумарний сигнал U_Σ формування стабілізувального моменту. Схему контуру підсумовування показано на рис. 9, *а*. Його використання, крім підвищення точності системи, забезпечує можливість її регулювання за допомогою одного потенціометра c_0.

Знайдемо сигнал на виході контуру підсумовування

$$U_\Sigma = c_0 U_{\text{к}} + s\left(U_{\text{к}} + c_0 U_{\text{к}}\right) = c_0 U_{\text{к}} + \left(1 + c_0\right) U_{\text{ш}},$$

де $U_{\text{ш}} = s U_{\text{к}}$.

Отже, переміщенням потенціометра c_0 одночасно можна регулювати й амплітуду, і фазу стабілізувального моменту

$$M_{\text{с}} = \sqrt{c_0^2 M_{Gm}^2 + \left(1 + c_0\right)^2 M_{Dm}^2};$$

$$\psi = \text{arctg}\frac{\left(1 + c_0\right) M_{Dm}}{c_0 M_{Gm}}.$$

Векторну діаграму контуру показано на рис. 9, *б*. Її аналіз показує, що контур c_0 дозволяє

змінювати амплітуду стабілізувального моменту від значення $M_{\text{с}} = M_{Dm}$, якщо $c_0 = 0$, до значення $M_{\text{с}} = M_{\text{с}\,m}$, якщо $c_0 = 1$. При цьому діапазон зміни фази становить $90° - \psi_m$.

За своїми характеристиками розглянутий контур за багатьма показниками аналогічний контуру $c_{\text{к}} - c_0$.

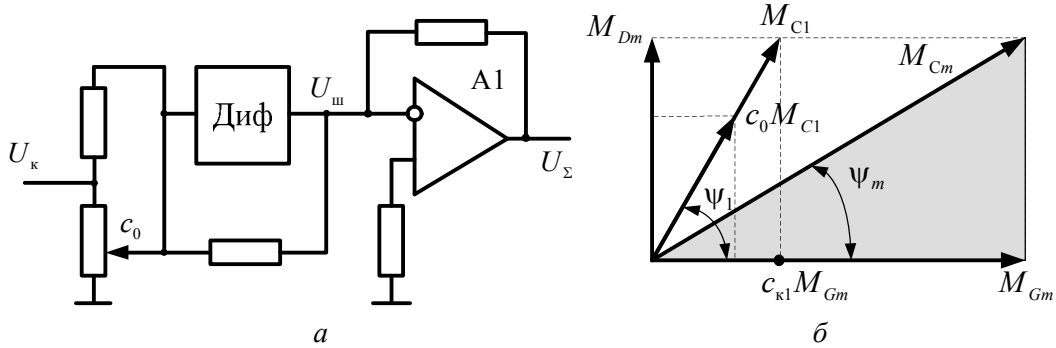

Рис. 9. Контур підсумовування c_0 : *а* – схемне рішення; *б* – векторна діаграма

Висновки.

1. За своїми характеристиками розглянуті контури дозволяють вибрати такі поєднання регульованих параметрів, за яких діючі на систему збурення компенсуються стабілізувальним моментом «у середньому», тобто так, щоб середнє (середньоквадратичне або середньоамплітудне) значення помилки не виходило за межі заданої технічними умовами точності.

2. Контур підсумовування $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$ забезпечує найбільш широкий діапазон регулювання амплітуди й фази стабілізувального моменту.

3. Оскільки на практиці основне значення мають регулювання з великими значеннями фазових зсувів, то затребуваність контуру підсумовування $c_{\text{к}} - c_0$ цілком очевидна, незважаючи на те, що він забезпечує більш вузький діапазон зміни фази стабілізувального моменту порівняно з контуром $c_{\text{к}} - c_{\text{ш}}$.

4. Слід відзначити обмеження діапазону регулювання фази стабілізувального моменту й контуром $c_{\text{ш}} - c_0$, особливо, якщо $M_{Dm} << M_{Gm}$. Саме тому контур доцільно застосовувати в САК з невеликою конструктивною G_m жорсткістю й підвищеним конструктивним демпфіруванням D_m.

5. Якщо взяти до уваги підвищення точності САК у разі використання контуру c_0 й простоту налаштування системи, то переваги цього контуру цілком очевидні.

Список літератури

1. *Аблесімов О. К.* Автоматичне керування рухомими об’єктами й технологічними процесами / О. К. Аблесімов, Є. Є. Александров, І. Є. Александрова – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – 443 с.
2. *Зайцев Г. Ф.* Теорія автоматичного управління / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов, О. І. Бріцький – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
3. *Аблесимов А. К.* Анализ влияния конструктивных параметров на устойчивость АСУ методом *D*-разбиения / А. К. Аблесимов, А. А. Сенькович // Електроніка та системи управління. – 2009. – №2(20). – С. 92 – 97.

А. К. Аблесимов, С. В. Пахомов, П. В. Погонец

Контуры суммирования систем автоматического управления

Рассмотрены возможности использования различных типов контуров суммирования в системах автоматического управления.

A. K. Ablesimov, S. V. Pahomov, P. V. Pogonets

The contours of the summation of automatic control systems

The possibilities of using different types of contour summation in the SAU is considered.