



УДК [621.867.3:622.612]:658.5

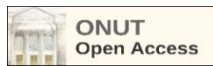
ПРОГНОЗУВАННЯ ВІЛЬНОГО РУХУ В СИСТЕМАХ ГАРАНТУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ЯК ШЛЯХ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

PREDICTION OF FREE MOTION IN GUARANTEED CONTROL SYSTEMS AS A MEANS OF ENHANCING THEIR EFFICIENCY

¹Хобін А.В., ²Степанов М.Т.¹Khobin A.V., ²Stepanov M.T.^{1,2}Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна^{1,2}Odesa National University of Technology, Odesa, UkraineORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0008-6448-4995>, ²<https://orcid.org/0000-0003-1297-5537>E-mail: ¹artem.khobin@gmail.com, ²stepanov197818@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI: 10.15673/atbp.v17i4.3326

Анотація. У статті розглядаються результати дослідження систем гарантуючого керування (СГК) з прогнозуванням складової їхнього вільного руху. Введення алгоритмів прогнозування вільного руху спрямоване на підвищення ефективності СГК в умовах коли об'єкти керування (ОК) є суттєво нестабільними, піддаються значним неконтрольованим збуренням та мають запізнення у каналах управління. СГК мають певну специфіку, яка пов'язана з подвійністю мети їх використання. А саме: «досягнення максимальної ефективності функціонування ОК та водночас забезпечення гарантованого дотримання встановлених для нього обмежень». Обидві складові цієї мети взаємопов'язані та взаємно суперечливі. Тому напрями розвитку СГК слід розглядати як процес підвищення рівнів, на яких досягаються компроміси між ефективністю та дотриманням обмежень.

В рамках дослідження було обґрунтовано обрано базові варіанти СГК. Тобто системи в алгоритми яких у подальшому інтегрувалися алгоритми прогнозування складових власного руху. Наведено їх структурні схеми та алгоритми керування, що базуються на різних моделях порушення регламенту. До базових систем віднесено також СГК з прогнозуванням складових вимушеного руху системи автоматичного керування (САК), де прогнозування траєкторій руху змінних в СГК реалізовано на базі кубічного та гармонійного сплайнів, параметричну ідентифікацію яких здійснюється в реальному часі. На базі цих варіантів систем проведено структурний та параметричний синтез СГК з прогнозуванням складових вільного руху на основі компенсації впливу запізнення на динаміку вільного руху системи.

При проведенні досліджень як основний метод використовувався метод імітаційного моделювання в середовищі Simulink системи Matlab. Для альтернативних варіантів систем розроблено схеми їхнього імітаційного моделювання, з імітацією нестационарних умов роботи ОК, а також критерії оцінки якості роботи цих систем. Результати досліджень показали, що прогнозування вимушеного та вільного руху змінних у системах гарантуючого керування забезпечує підвищення рівнів, на яких досягаються компроміси між ефективністю ОК та дотриманням встановлених для нього обмежень.

Abstract. The article discusses the results of research on guaranteed control systems (GCS) with prediction of the components of their free motion. The introduction of free motion prediction algorithms is aimed at improving the efficiency of GCS under conditions where control objects (CO) are significantly unstable, subject to considerable uncontrolled disturbances, and have delays in the control channels. GCS have a certain specificity related to the duality of their purpose, namely: “achieving maximum efficiency of CO operation while simultaneously ensuring guaranteed compliance with the established constraints.” Both components of this goal are interrelated and mutually contradictory. Therefore, the directions of GCS development should be considered as a process of raising the levels at which compromises between efficiency and constraint compliance are achieved.



Within the framework of the research, basic variants of GCS were reasonably selected — that is, systems whose algorithms subsequently integrated free motion prediction algorithms. Their structural schemes and control algorithms based on various models of regulation violation are presented. The basic systems also include GCS with prediction of the components of forced motion in automatic control systems (ACS), where prediction of the trajectories of variables in GCS is implemented on the basis of cubic and harmonic splines, whose parametric identification is carried out in real time. Based on these variants of systems, structural and parametric synthesis of GCS with prediction of free motion components was performed, using compensation of delay effects on the dynamics of the system's free motion.

In the research, the main method used was simulation modeling in the Matlab Simulink environment. For alternative system variants, simulation modeling schemes were developed, including simulation of non-stationary operating conditions of CO, as well as criteria for evaluating the quality of these systems. The results of the research showed that prediction of both forced and free motion of variables in guaranteed control systems ensures higher levels at which compromises between CO efficiency and compliance with the established constraints are achieved.

Keywords: Prediction, guaranteed control system, free motion in the system, automatic control system.

Ключові слова: Прогнозування, система гарантуючого керування, вільний рух в системі, система автоматичного керування.

ВСТУП. Системами гарантуючого керування (СГК) [1] називають варіанти систем автоматичного керування (САК), які реалізують, наряду з іншими (традиційними) функціями (програмно-логічного керування, регулювання, оптимізації), функцію гарантування, тобто забезпечення дотримання встановлених технологічних, експлуатаційних, екологічних та інших регламентів для об'єктів керування (ОК) з наперед заданою ймовірністю. Порушення регламентів призводять до аварійних зупинок технологічних агрегатів (ТА) та реалізованих ними технологічних процесів (ТП), втрат сировини, браку готової продукції, перевитрат енергоресурсів, швидкого зносу обладнання та інше.

Проблема ускладнюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ТА і реалізації ТП є близькими до максимально допустимих, що є типовим явищем. Крім того, ТП і ТА як ОК є суттєво нестабільними, піддаються значним неконтрольованим збуренням і мають запізнення в каналах керування.

Хоча теорія СГК достатньо опрацьована і має позитивний практичний досвід застосування для керування об'єктами технологічного типу [1...3], завдання підвищення ефективності САК залишається актуальним і для СГК. Важливо зазначити, що традиційні підходи до підвищення ефективності САК (пошукова оптимізація режимів, адаптація алгоритмів керування, інваріантність щодо контрольованих або опосередковано відновлених неконтрольованих збурень, прогнозування змінних на час запізнення) зберігаються, але потребують врахування специфіки СГК.

Основною особливістю цієї специфіки є подвійність мети застосування СГК: «досягнення максимальної ефективності функціонування ОК та водночас забезпечення гарантованого дотримання встановлених для нього обмежень». Обидві складові цієї мети взаємопов'язані та взаємно суперечливі. Тому напрями розвитку СГК слід розглядати як процес підвищення рівнів, на яких досягаються компроміси між ефективністю і дотриманням обмежень. В рамках цього процесу розвитку у даній статті розглядається один з варіантів підвищення ефективності СГК що базується на основі прогнозування «власного» руху САК.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Прогнозування траєкторій руху змінних в САК, передусім керованих, може бути реалізоване у двох варіантах:

- 1) вибраними сплайнами, параметрична ідентифікація яких здійснюється у реальному часі, на кожному новому кроці його квантування – цей варіант часто називають прогнозуванням «вимушеного руху» САК, [3];
- 2) упереджувачами, алгоритми яких базуються на математичних моделях каналів ОК із запізненням - цей варіант називають прогнозуванням «вільного» або «власного» руху САК [4].

В [3] представлені СГК з прогнозуванням складових вимушеного руху. В цих системах прогнозування траєкторій руху змінних, на час запізнення в каналі керування ОК вперед, реалізовано на базі кубічного та гармонійного сплайнів, параметрична ідентифікація яких здійснюється у реальному часі. Алгоритми прогнозування потребують багаторазового диференціювання прогнозованих змінних, але ця умова повністю виконується для, більшості технологічних об'єктів. В цілому в цих системах прогнозування вимушеного руху забезпечило підвищення їх ефективності, але для деяких варіантів систем це підвищення в умовах нестаціонарних властивостей ОК було не завжди значним. Одною з причин може бути значне зниження запізнення в каналі керування, при моделюванні параметричних збурень, при одночасному збереженні фіксованого значення інтервалу прогнозування. В такому випадку можливо збільшення похибки прогнозування і відповідно зниження ефективності роботи СГК. Таким чином прогнозування траєкторій вимушено руху змінних підвищує ефективність СГК та одночасно є актуальність подальшого вдосконалення таких систем.

САК з упереджувачами, алгоритми яких базуються на математичних моделях каналів ОК із запізненням і фактично реалізують прогнозування «вільного» або «власного» руху САК отримують високу оцінку при практичному використанні. Використання упереджувача Сміта [4]. для керування промисловими об'єктами підтримується зокрема фірмою Siemens у бібліотеці підпрограм SIMATIC PCS7 APC-Library (Advanced Process Library) яка розповсюджується для відомого середовища розробки прикладного програмного забезпечення - PCS



7. Системи з упереджувачем Сміта часто застосовуються для керування нестационарними об'єктами харчової промисловості з запізненням в каналах керування [1]. Розглянуті алгоритми розширюють запас стійкості систем і забезпечують зниження помилок відтворення більш ефективно ніж помилок стабілізації.

Таким чином задача підвищення ефективності SGK на основі прогнозування складових її вільного руху в рамках процесу розвитку SGK є безперечно актуальною. При цьому використання алгоритмів прогнозування складових вільного руху підходить як до звичайних алгоритмів гарантуючого керування так і для алгоритмів гарантуючого керування з прогнозуванням складових вимушеного руху. Алгоритми прогнозування складових вимушеного руху та вільного руху в СГУ не протирічать, а доповнюють один одного.

У даній статті розглядається один з варіантів підвищення ефективності SGK що базується на основі прогнозування вільного руху САК.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення ефективності SGK, а саме підвищення рівнів, на яких досягаються компроміси між ефективністю і дотриманням обмежень встановлених для ОК, за рахунок інтеграції в SGK алгоритмів прогнозування вільного руху САК. Для досягнення визначеної мети необхідно провести структурний і параметричний синтез SGK з модулями прогнозування вільного руху САК та провести порівняльний аналіз цих альтернативних варіантів систем з вже існуючими варіантами SGK.

МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

При проведенні досліджень в якості основного методу використовувався метод імітаційного моделювання в середовищі Simulink системи Matlab. Для цього на першому етапі було обрано базові варіанти SGK, тобто такі варіанти для яких є позитивний практичний досвід застосування для керування об'єктами технологічного типу і актуально додавання функції прогнозування вільного руху в їх алгоритми. В базові варіанти систем також включено системи з прогнозуванням складових вимушеного руху. Прогнозування вільного руху доповнює алгоритми керування і не протирічить вже існуючим алгоритмам прогнозу складових вимушеного руху. Для базових варіантів СГУ розроблено структурні схеми та алгоритми гарантуючого керування. Далі з використанням принципів побудови систем із прогнозуванням вільного руху було отримано структурні схеми SGK з прогнозуванням складових вільного руху в контурі гарантування та конкретизовано алгоритми прогнозування. Для альтернативних варіантів SGK були розроблені імітаційні моделі у середовищі Simulink, конкретизовано умови проведення експериментів та критерії оцінки якості роботи SGK. Розглянемо більш детально ці етапи дослідження.

У літературі представлено досить багато варіантів структур і алгоритмів управління для SGK. Зупинимось на розгляді частини з них, які є актуальними для об'єктів технологічного типу.

Насправді досить часто зустрічається ситуація коли обмеження на регульовану змінну $y(t)$ накладено «згори», $y^{рр} \leq y^{рр+}$ і з наближення $y(t)$ до $y^{рр+}$ ефективність роботи об'єкта монотонно зростає. Тоді допустиме задане значення контуру регулювання визначається за умови:

$$y^{зл+}(t) = \arg \min \{y^{рр+} - y(t)\} \mid \hat{P}_s(y^{рр+}, y^{зл+}, T_{кст}, t) = P_s^r(y^{рр+}, T_{кст}) \quad (1)$$

де $\hat{P}_s(y^{рр+}, y^{зл+}, T_{кст}, t)$ - оцінка поточного значення ймовірності відсутності події S (порушення змінною $y(t)$ її гранично допустимого значення $y^{рр}$) на інтервалі часу $T_{кст}$;

$P_s^r(y^{рр+}, T_{кст})$ - задана (гарантована) ймовірність відсутності S (\bar{S}) на інтервалі часу $T_{кст}$.

І тут можливі такі варіанти структур SGK, де розрахунок $y^{зл+}(t)$ проводиться:

- у контурі стабілізації оцінки поточного значення середньої частоти S $\hat{n}_s^+(y^{рр+}, t)$ (рис. 1 а);
- безпосередньо за моделлю порушення регламенту (МПП) (рис. 1 б).

Модулі в наведених варіантах SGK мають наступні назви: МРДЧП - модуль розрахунку допустимої частоти порушення регламенту; МОЙХ - модуль оцінки ймовірнісних характеристик; МОЧП - модуль оцінки поточної частоти порушень; МРЗД - модуль розрахунку допустимого заданого значення.

Наведені структурні схеми (рис. 1) мають дещо узагальнений характер. Їх конкретний вид може змінюватися в залежності від обраного алгоритму гарантуючого управління та змінних системи, які використовуються в цих алгоритмах.

Алгоритмічний склад, що реалізує функцію гарантування в ланцюзі додаткового зворотного зв'язку, визначається видом прийнятої моделі математичного очікування $y(t) - m_y(t)$.

Розглянемо такі варіанти:

а) $m_y(t)$ квазістационарна і квазіпостійна на $T_{кст}$: $m_y(t) \gg m_y = \text{const} \quad t \in T_{кст}$. У цьому випадку МОЧП, в якому розраховується поточне значення $\hat{n}_s^+(y^{рр+}, t)$, реалізує наступне вираз:

$$\hat{n}_s^+(y^{рр+}, t) = \frac{\hat{\sigma}_y(t)}{2\pi\hat{\sigma}_y(t)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^+ \left(\frac{y^{рр+} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

де $\Delta y^+ = y^{рр+} - y(t)$. А МРДЧП реалізує вираз



$$n_s^{d+}(y^{rp+}) = -\ln P_s^r(y^{rp+}, T)/T. \quad (3)$$

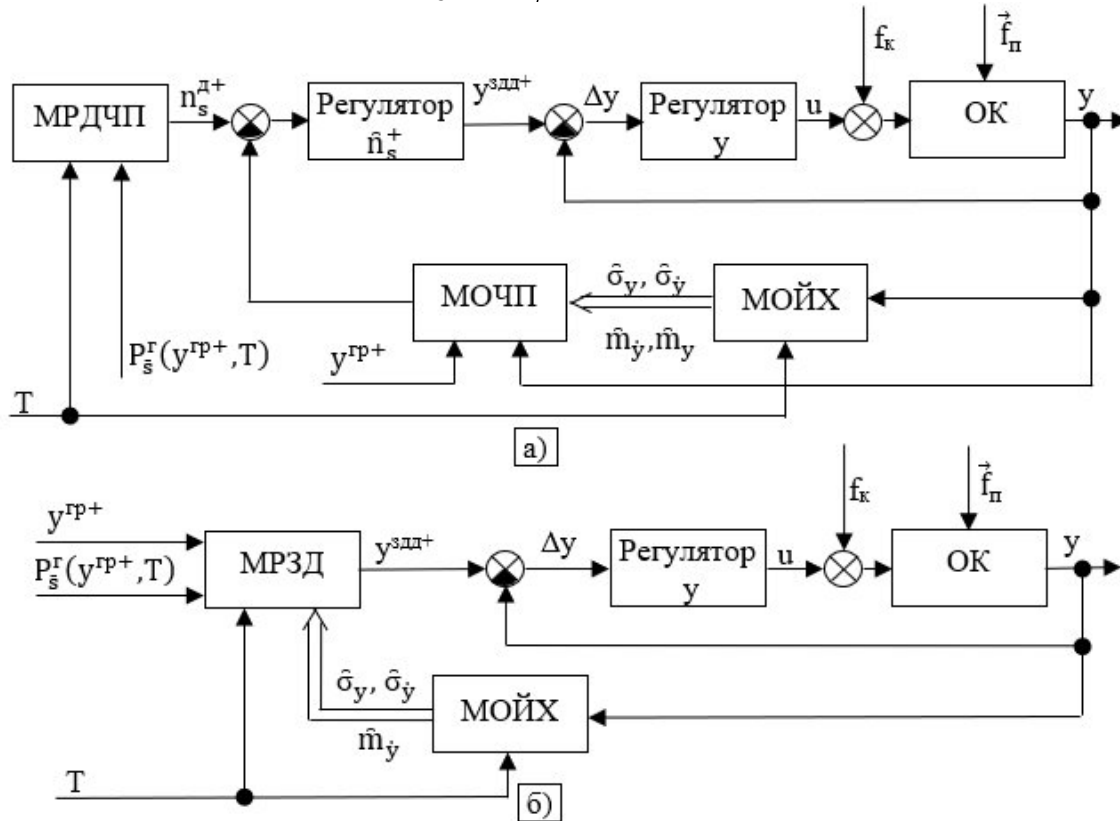


Рис. 1 - Структурні схеми замкнутих СГУ: а) з розрахунком $y^{здд+}$ контуру регулювання в контурі стабілізації частоти порушень; б) з розрахунком $y^{здд+}$ контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту

Fig. 1 - Structural diagrams of closed-loop GCS: a) with calculation of $y^{здд+}$ of the control loop in the violation frequency stabilization loop; b) with calculation of $y^{здд+}$ of the control loop directly according to the regulation violation model

З огляду на властивості контуру регулювання, коли $y(t)$ «відслідковує» зміна $y^{здд+}$, можна покласти, що $m_y(t) \approx y^{здд+}(t)$. Замінімо в (2) поточне значення оцінки частоти порушень $\hat{n}^+(y^{rp+}, t)$ його допустимим значенням $n_s^{d+}(y^{rp+})$, яке визначається за (3) відповідно до заданої гарантованої ймовірності відсутності S - $P_s^r(y^{rp+}, T_{кст})$, а поточне значення оцінки $\hat{m}_y(t)$ - значенням $y^{здд+}(t)$. Тоді, розрахував (2) щодо $y^{здд+}(t)$, отримуємо алгоритм, який у даному варіанті має реалізувати MRЗД:

$$y^{здд+}(t) = y^{rp+} - \hat{\sigma}_y(t) \sqrt{2 \ln \left[\frac{-T \hat{\sigma}_y(t)}{2\pi \hat{\sigma}_y(t) \ln P_s^r(y^{rp+}, T)} \right]}. \quad (4)$$

Значення поточних оцінок $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{\sigma}_y(t)$, $\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)$ для (2) і (4) визначаються в МОЙХ на ковзному інтервалі часу $T_{кст}$ у відповідність з наступними виразами:

$$\hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_{кст}} \int_t^{t+T_{кст}} y(t) dt, \quad \hat{\sigma}_y(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}} \int_t^{t+T_{кст}} (y(t) - \hat{m}_y(t))^2 dt}, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}} \int_t^{t+T_{кст}} \dot{y}(t)^2 dt}. \quad (5)$$

Слід зазначити, що вибір величини інтервалу $T_{кст}$ має відповідати як властивостям статистичної стійкості оцінок, а й стійкості СГК. Остання вимога обумовлює нижню межу $T_{кст}$ у разі сумірним з часом перехідних процесів у внутрішньому контурі (контурі регулювання).

б) $m_y(t)$ нестационарна на $T_{кст}$ і є невідомою функцією часу, що швидко змінюється: $m_y(t) = \text{var } t \uparrow T_{кст}$.

У цьому випадку алгоритм, що реалізується МОЧП, буде описуватися виразом:

$$\hat{n}_s^+(y^{rp+}, t) = \frac{\hat{\sigma}_y(t)}{2\pi \hat{\sigma}_y(t)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^+ \left(\frac{y^{rp+} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \right)^2 \right\} \times$$



$$\times \left\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_y^2(t)}{2\hat{\sigma}_y^2(t)} \right) + \sqrt{2\pi} \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \Phi \left(\frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \right) \right\}, \quad (6)$$

а МРЗД повинен реалізувати вираз:

$$y^{злд+}(t) = y^{р+} - \hat{\sigma}_y(t) \sqrt{2 \ln \left| \frac{-T \hat{\sigma}_y(t)}{2\pi \hat{\sigma}_y(t) \ln P_s^r(y^{р+}, T)} \right\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_y^2(t)}{2\hat{\sigma}_y^2(t)} \right) + \frac{\sqrt{2\pi} \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \Phi \left(\frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \right) \right\}}, \quad (7)$$

де $\Phi()$ – інтеграл ймовірності.

В даному випадку, на відміну від попереднього, математичні очікування та середньоквадратичні відхилення мають різні інтервали квазістаціонарності, тому одержання $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{\sigma}_y(t)$ ведеться осередненням $y(t)$ на інтервалі $T_{кст}^m$, а $\hat{\sigma}_y(t)$ і $\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)$ осередненням відповідних центрованих складових на інтервалі $T_{кст}^\sigma$, причому $T_{кст}^m < T_{кст}^\sigma = T_{кст}$:

$$\hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_{кст}^m} \int_t^{t+T_{кст}^m} y(t) dt; \quad \hat{m}_{\dot{y}}(t) = \frac{1}{T_{кст}^m} \int_t^{t+T_{кст}^m} \dot{y}(t) dt;$$

$$\hat{\sigma}_y(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}^\sigma} \int_t^{t+T_{кст}^\sigma} (y(t) - \hat{m}_y(t))^2 dt}; \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}^\sigma} \int_t^{t+T_{кст}^\sigma} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}}(t))^2 dt}. \quad (8)$$

Під час роботи СГК, на основі розрахованих оцінок імовірнісних характеристик $y(t)$, у відповідність до розглянутих алгоритмів проводить постійне коригування режимів роботи ОК, змінюючи задане значення внутрішньому контуру регулювання $y^{злд+}(t)$, забезпечуючи виконання завдання (1). Вибір конкретного алгоритму гарантування залежить від вимог, що пред'являються до системи, властивостей ОК, умов його функціонування і здійснюється безпосередньо розробником. Однак можна відзначити, що алгоритм «б» є більш швидким і забезпечує більш високу динамічну точність системи в порівнянні з алгоритмом «а».

Алгоритми гарантування утворюють у системі додатковий замкнутий контур керування, динаміка якого значною мірою залежить від запізнення в ОК. Наявність запізнення в каналі керування не дозволяє змінної $y(t)$ одразу реагувати на зміну $y^{злд+}(t)$, що для швидких алгоритмів (варіант «б») погіршує якість роботи системи та ефективність розв'язання задачі (1). Компенсувати вплив запізнення можливо за рахунок введення в алгоритми функції прогнозування гарантуючого керування на час, порівнянний з часом запізнення, вперед.

Принципи побудови систем гарантуючого управління з прогнозуванням траєкторії зміни допустимого заданого значення.

Для СГУ зі швидкими алгоритмами ефективність розв'язання задачі (1) багато в чому залежить від запізнення у каналі керування ОК. Воно не дозволяє системі своєчасно реагувати на зміну $y^{злд+}(t)$, що збільшує дисперсію $\hat{y}^0(t)$, а в окремих випадках може призводити до виникнення S. Для дотримання умови $\hat{P}_s(y^{р+}, y^{злд+}, T_{кст}, t) = P_s^r(y^{р+}, T_{кст})$ СГК «відсуває» $y^{злд+}(t)$ далі від $y^{р+}$, що знижує ефективність функціонування ОК. Підвищення якості роботи системи можливе за рахунок використання в розрахунку прогнозування необхідних компонентів $y(t)$ на час $\tau_{пр}$ порівнянне з часом запізнення в каналі керування τ_0 . Таке прогнозування, перш за все, відноситься до «швидких» змінних $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{m}_{\dot{y}}(t)$ так як $\hat{\sigma}_y(t)$ і $\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)$ є досить повільними і інтервал квазістаціонарності у них набагато більше запізнення.

Проведений аналіз показує, що окремі ділянки траєкторії руху $y(t)$ можуть бути представлені безперервними, багаторазово диференційованими функціями (сплайнами). Це дає можливість для прогнозування (екстраполяції) змінних апіорі вибрати «досить хорошу» модель (сплайн) траєкторії зміни цих змінних на інтервалі прогнозування і потім в реальному часі проводити поточну ідентифікацію її параметрів.

У загальному випадку рух у системі має як вільну, так і вимушену складові. Інерційності каналів регулювання, наявність замкнутого контуру обумовлюють багаторазову диференційність і коливність складової вільного руху швидких САР. Велика кількість складових у координатних збуреннях та їх перетворення інерційними каналами ОК дозволяє розглядати їх у вигляді багаторазово диференційованого випадкового гаусівського процесу. Проходження цих процесів через канали САР призводить до формування вимушеної складової руху $y(t)$, часто у вигляді вузькосмугового, випадкового процесу. Такі властивості $y(t)$ дозволяють досить добре апроксимувати траєкторії зміни змінних $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{m}_{\dot{y}}(t)$ гармонійним або кубічним сплайном.

Гармонійний сплайн

$$\hat{m}_y(t + \Delta\tau_{i0}) = \hat{m}_y(t) + \hat{A}_m(t) \times \sin(\hat{\omega}_m(t)(t + \Delta\tau_{i0}) + j_m(t)), \quad Dt_{пр} \hat{I} [0, t_{пр}]. \quad (9)$$



У (9) поточні значення параметрів узагальненої синусоїди $\hat{m}_y(t), \hat{A}_m(t), \hat{\omega}_m(t), \hat{j}_m(t)$ оцінюються і приймають нові значення в кожен момент часу t . І тільки на відрізку часу $Dt_{np} \in [0, t_{np}]$, на яке здійснюється прогнозування, і яке, по суті, є «машинним», а не реальним часом, вони зберігаються незмінними.

Підставляючи (9) з $Dt_{np} = t_{np}$ в (6) отримаємо вираз для розрахунку прогнозованого на t_{np} значення інтенсивності викидів, яке для аналізованого алгоритму має бути реалізовано МОЧП.

Знайдемо співвідношення, що дозволяють оцінювати параметри моделі (9) в даний час $t = t_0$ за значеннями $\hat{m}_y(t_0)$ та її похідними. Оскільки загальна кількість параметрів, що оцінюються, дорівнює чотирьом, то необхідно

додатково мати в момент t_0 значення трьох похідних. Тоді отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \hat{m}_y(t_0) = \hat{m}_y(t_0) + \hat{A}_m(t_0) \sin(\hat{\omega}_m(t_0)t + \hat{j}_m(t_0)) \\ \hat{d}\hat{m}_y(t_0)/dt = \hat{m}_{\xi}(t_0) = \hat{A}_m(t_0)\hat{\omega}_m(t_0)\cos(\hat{\omega}_m(t_0)t + \hat{j}_m(t_0)) \\ \hat{d}^2\hat{m}_y(t_0)/dt^2 = \frac{d\hat{m}_{\xi}(t_0)}{dt} = -\hat{A}_m(t_0)\hat{\omega}_m^2(t_0)\sin(\hat{\omega}_m(t_0)t + \hat{j}_m(t_0)) \\ \hat{d}^3\hat{m}_y(t_0)/dt^3 = \frac{d^2\hat{m}_{\xi}(t_0)}{dt^2} = \frac{d\hat{m}_{\xi}(t_0)}{dt} = -\hat{A}_m(t_0)\hat{\omega}_m^3(t_0)\cos(\hat{\omega}_m(t_0)t + \hat{j}_m(t_0)) \end{cases} \quad (10)$$

Вирішуючи (10), отримаємо:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_m(t_0) &= \sqrt{\hat{m}_{\xi}(t_0)/\hat{m}_{\xi}(t_0)}, \quad \hat{j}_m(t_0) = -\arctg(\hat{m}_{\xi}(t_0)/\hat{\omega}_m(t_0)\hat{m}_{\xi}(t_0)) \\ \hat{A}_m(t_0) &= \hat{m}_{\xi}(t_0)/\hat{\omega}_m(t_0)\cos\hat{j}_m(t_0), \quad \hat{m}_y(t_0) = \hat{m}_y(t_0) - \hat{A}_m(t_0)\sin\hat{j}_m(t_0). \end{aligned} \quad (11)$$

Оцінку квазіпостійної складової $m_y(t)$ можна, використовуючи аналогічний підхід, знайти з виразу:

$$\hat{m}_{\xi}(t_0) = \hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{A}_m(t_0)\hat{\omega}_m(t_0)\cos\hat{j}_m(t_0). \quad (12)$$

Кубічний сплайн

$$\begin{aligned} \hat{m}_y(t + \Delta\tau_{i0}) &= \hat{m}_y(t) + \hat{d}(t)(t + \Delta\tau_{i0})^3 + \hat{c}(t)(t + \Delta\tau_{i0})^2 + \hat{b}(t)(t + \Delta\tau_{i0}) + \hat{a}(t), \\ \hat{m}_{\xi}(t + \Delta\tau_{i0}) &= \hat{m}_{\xi}(t) + \hat{d}_1(t)(t + \Delta\tau_{i0})^3 + \hat{c}_1(t)(t + \Delta\tau_{i0})^2 + \hat{b}_1(t)(t + \Delta\tau_{i0}) + \hat{a}_1(t), \end{aligned} \quad (13)$$

$Dt_{np} \in [0, t_{np}]$.

Тоді, якщо можуть бути знайдені значення трьох похідних цих оцінок в момент часу $t = t_0$, то оцінки значень коефіцієнтів (13) визначаються з простих і зручних для розрахунку в реальному часі співвідношень:

$$\begin{aligned} \hat{d}(t_0) &= \hat{m}_{\xi}(t_0)/6, \quad \hat{d}_1(t_0) = \hat{m}_{\xi}(t_0)/6, \\ \hat{c}(t_0) &= (\hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0)/2, \quad \hat{c}_1(t_0) = (\hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0)/2, \\ \hat{b}(t_0) &= \hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0 + \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^2/2, \quad \hat{b}_1(t_0) = \hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0 + \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^2/2, \\ \hat{a}(t_0) + \hat{m}_y(t_0) &= \hat{m}_y(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0 + \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^2/2 - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^3/6, \\ \hat{a}_1(t_0) + \hat{m}_{\xi}(t_0) &= \hat{m}_{\xi}(t_0) - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0 + \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^2/2 - \hat{m}_{\xi}(t_0)t_0^3/6, \end{aligned} \quad (14)$$

а прогнозовані на t_{np} вперед значення необхідних оцінок розраховуються з виразів:

$$\begin{aligned} \hat{m}_y(t_0 + \tau_{i0}) &= \hat{d}(t_0)(t_0 + \tau_{i0})^3 + \hat{c}(t_0)(t_0 + \tau_{i0})^2 + \hat{b}(t_0)(t_0 + \tau_{i0}) + \hat{a}(t_0) + \hat{m}_y(t_0), \\ \hat{m}_{\xi}(t_0 + \tau_{i0}) &= \hat{d}_1(t_0)(t_0 + \tau_{i0})^3 + \hat{c}_1(t_0)(t_0 + \tau_{i0})^2 + \hat{b}_1(t_0)(t_0 + \tau_{i0}) + \hat{a}_1(t_0) + \hat{m}_{\xi}(t_0). \end{aligned} \quad (15)$$

Необхідною умовою роботи алгоритму є триразова диференційованість $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{m}_{\xi}(t)$. Ця умова цілком здійсненна, тому що змінні на виході ОК, відфільтровані від шумів, як правило, є багаторазово диференційованими.

В обох розглянутих сплайнах розрахунок їх коефіцієнтів ведеться у припущенні, що в момент t_0 відомі значення самої змінної та всіх необхідних похідних. У разі цифрової реалізації алгоритму управління, а саме вона передбачається як основна, похідні обчислюються за значеннями решітчастої функції $\hat{m}_y(nT_{кв}), n = \overline{0, \infty}$, з кроком квантування $T_{кв}$.

Структурні схеми розглянутих варіантів СГУ з прогнозуванням вимушеного руху представлені на рисунку 2.

Розглянемо принцип побудови систем із прогнозуванням вільного руху та його застосування до прогнозування в контурі гарантування.

Запізнення або висока розмірність каналів управління, яка апроксимується запізненням, є головною перешкодою підвищення динамічної точності системи, і забезпечення її стійкості, особливо для істотно нестационарних об'єктів (K, T, t_0 -суттєво змінюються). Розглянемо шлях компенсації впливу запізнення на



динаміку власного руху системи (тобто не вимушеного, викликаного вхідними впливами). Структурна схема такої системи наведена на рис.3.

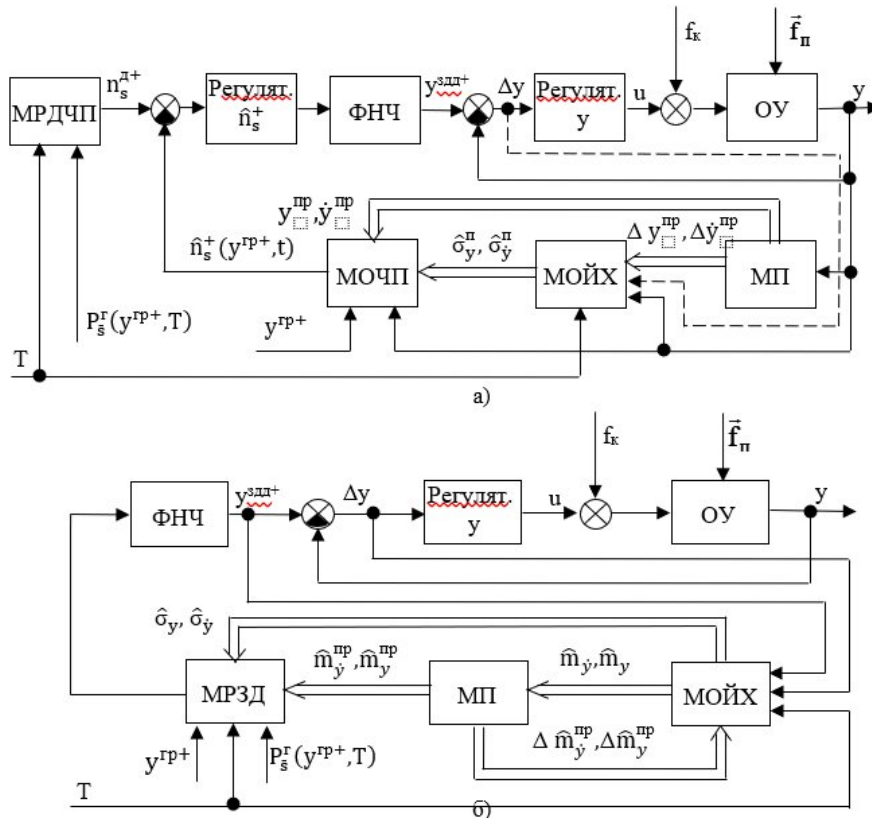


Рис. 2 – Структурні схеми SGK із прогнозуванням вимушеного руху
Fig. 2 – Structural diagrams of the GCS with forced motion prediction

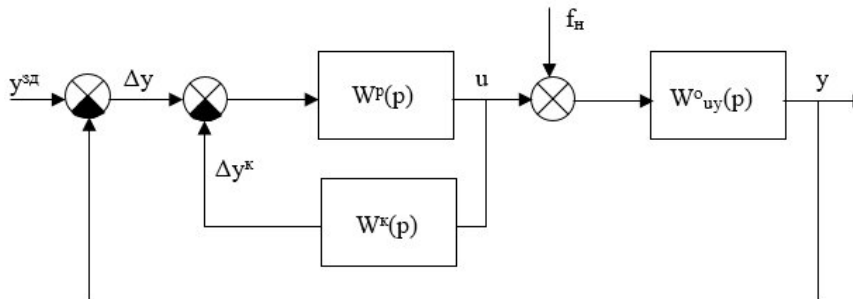


Рис. 3 – Структурна схема САР із компенсацією впливу запізнення на динаміку власного руху системи
Fig. 3 – Structural diagram of the ACS with compensation of the influence of delay on the dynamics of the system's own motion

Запізнення не впливатиме на власний рух САР у тому випадку, якщо його передатна функція не входить до власного оператора системи - $Q(p)$. Ця умова буде виконуватися якщо передатна функція ланки коригуючого зв'язку буде мати наступний вигляд:

$$W^k(p) = (1 - e^{-\tau_{\text{уу}}^M p}) \cdot W_{\text{уу}}^{\text{oM}}(p),$$

де $e^{-\tau_{\text{уу}}^M p}$ - модель запізнення об'єкта

$W_{\text{уу}}^{\text{oM}}(p)$ - передатна функція моделі об'єкт без запізнення.

Розглянемо реалізацію $W^k(p)$: вона є фізично реалізованою.

При розрахунку упереджувача для SGK під об'єктом розумітимемо САР без контуру гарантування. Тобто при синтезі SGK з прогнозуванням складової вільного руху будемо вважати що внутрішній контур регулювання це і є наш об'єкт керування. На основі моделі цього контуру ми будемо розрахувати передатну функцію коригувального зв'язку.



Структурні схеми систем гарантуючого керування з прогнозуванням вільного руху

У разі систем гарантуючого керування як об'єкт керування із запізненням виступає система автоматичного регулювання по каналу $y^{зд+}$ - y . При цьому регулятором виступають інші модулі СГК. При цьому для системи з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту це модуль розрахунку допустимого заданого значення $y^{зд+}$ (МРЗД) та модуль оцінки ймовірнісних характеристик (МОЙХ) регламентованої змінної. Для СГК з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання в контурі стабілізації частоти порушень це модуль розрахунку допустимої частоти порушень (МРДЧП), модуль оцінки частоти порушень (МОЧП) та модуль оцінки ймовірнісних характеристик (МОЙХ) регламентованої змінної. Тому в обох випадках входом для модуля прогнозування вільного руху (МПрВР) буде гарантує керування $u^Г = y^{зд+}$, а його вихід буде додаватися до регламентованої змінної y , яка подається на вхід МОЙХ.

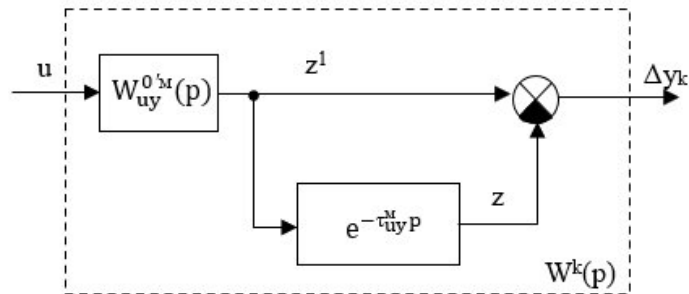


Рис. 4 - Схема передатної функції коригувального зв'язку
Fig. 4 - Scheme of the transfer function of the corrective coupling

Рисунки 5 та 6 ілюструють сказане вище.

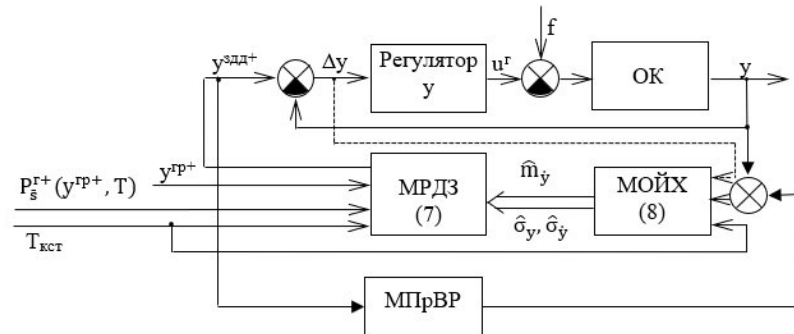
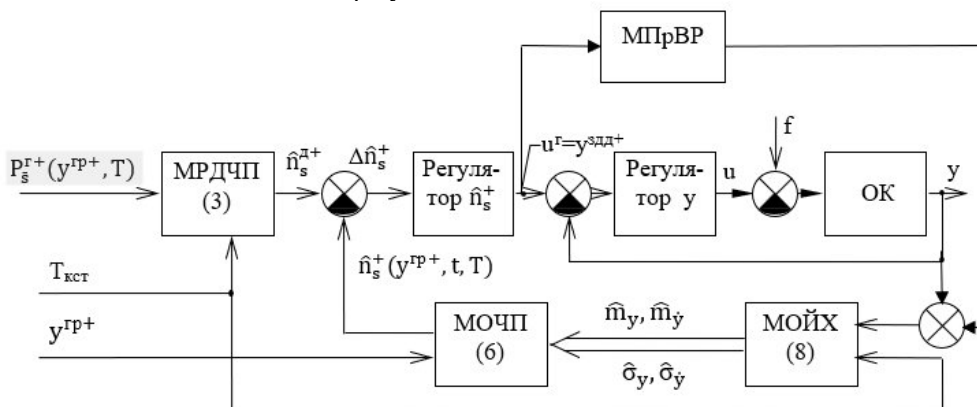


Рис. 5 - Структурна схема замкнутої СГУ з прогнозуванням вільного руху з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту
Fig. 5 - Block diagram of a closed-loop GCS with free motion prediction with calculation of the permissible value of the control loop setpoint directly based on the regulation violation model

Слід зазначити, що в тому випадку, коли оцінка ймовірнісних характеристик ведеться не по самій регламентованій (в даному випадку - регульованій) змінній, а по помилці регулювання, змінна з модуля прогнозування додається з цією помилкою регулювання.



**Рис. 6 - Структурна схема замкнутої СГУ з прогнозуванням вільного руху з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання в контурі стабілізації частоти порушень****Fig. 6 - Block diagram of a closed-loop GCS with free motion prediction and calculation of the permissible value of the control setpoint in the disturbance frequency stabilization loop**

Проведемо вибір альтернативних варіантів систем керування для їх порівняльного дослідження та конкретизуємо їх структури та умови експериментів.

Мета досліджень є визначення ефективності СГК, які використовують алгоритми з прогнозуванням вільного руху, порівняно з вже існуючими СГК. Раніше була введена класифікація СГК за п'ятьма ознаками її структури [2]. Введемо шосту ознаку, яка відобразить наявність (або відсутність) у СГК прогнозування вільного руху в контурі гарантування. Його ідентифікатор - "1" або "0" на шостій позиції коду СГК. Зазначена класифікація СГУ наведена в таблиці 1.

Для проведення порівняльних досліджень було відібрано 8 варіантів СГК:

а) зі стабілізацією:

1 - код 1.2.0.2.1.0 - без прогнозування траєкторії (вимушеного руху в СГУ), без прогнозування вільного руху;

2 - код 1.2.0.2.1.1 - без прогнозування траєкторії, з прогнозуванням вільного руху;

3 - код 1.2.1.2.1.0 - з прогнозуванням траєкторії, без з прогнозуванням вільного руху;

4 - код 1.2.1.2.1.1 - з прогнозуванням траєкторії, з прогнозуванням вільного руху;

б) з безпосереднім розрахунком:

5 - код 2.2.0.2.1.0 - без прогнозування траєкторії, без прогнозування вільного руху;

6 - код 2.2.0.2.1.1 - без прогнозування траєкторії, з прогнозуванням вільного руху;

7 - код 2.2.1.2.1.0 - з прогнозуванням траєкторії, без з прогнозуванням вільного руху;

8 - код 2.2.1.2.1.1 - з прогнозуванням траєкторії, з прогнозуванням вільного руху;

Таблиця 1 - Кодування досліджуваних варіантів СГК

№ позиції у кодї СГК	Особливості структури та алгоритму СГК	Ідентифікатор	
1	Головна ознака структури	стабілізація \hat{n}_s	1
		безпосередній розрахунок $y^{зд}$	2
2	Особливість моделі порушення регламенту, що використовується в алгоритмі	стаціонарне m_y ($m_y = \text{const}$)	1
		нестационарне m_y ($m_y = \text{var}$)	2
3	Застосування в алгоритмі та особливості прогнозування траєкторії зміни допустимого заданого значення	без прогнозування	0
		з прогнозуванням по гармонійному сплайну	1
		з прогнозуванням по кубічному сплайну 1	2
		з прогнозуванням по кубічному сплайну 2	3
4	Застосування в алгоритмі управління опосередкування змінних u та \dot{u}	змінні u та \dot{u} не використовуються	0
		знаходяться оцінки \hat{m}_y , $\hat{\dot{m}}_y$	1
		осереднення не виконується	2
		знаходиться оцінка тільки m_y	3
5	Змінні, що використовуються для розрахунку оцінок середньоквадратичних відхилень	регульована змінна u	1
		помилка регулювання Δu	2
6	Застосування в алгоритмі керування прогнозування вільного руху	без прогнозування	0
		з прогнозуванням	1

Конкретизація умов дослідження варіантів СГК та вибір критеріїв для оцінки їх ефективності.



Практика розробки САК показує, що найбільш конструктивний шлях - використання малопараметрових моделей невисокого порядку із запізненням, де введенням запізнення враховується структурна невизначеність моделей ОК. Тому як модель ОК будемо використовувати:

$$W(p) = k_0 e^{-\tau_0 p} / (T_0 p + 1)^2$$

де p - оператор диференціювання (d/dt);

k_0 - коефіцієнт передачі ОК;

T_0 - постійна часу ОК.

Як регулятор внутрішнього контуру СГУ будемо використовувати реальний ПІД регулятор з обмеженнями на інтегральну складову і керуючу дію. Схема моделювання САР наведена на рисунку 7.

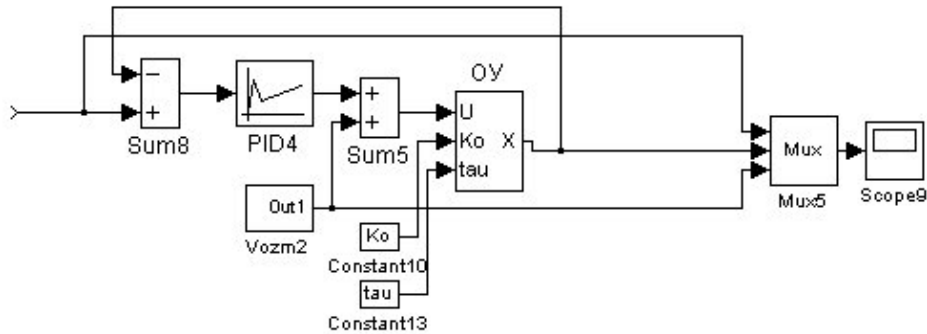


Рис. 7 - Загальна схема моделювання САР
Fig. 7 - General scheme of ACS modeling

Модель впливів (координатних збурень) приймаємо у вигляді багаторазово диференційованого випадкового гаусовського процесу. Також приймаємо, що параметри ОК τ_0 і k_0 під час моделювання змінюються періодично, у вигляді сигналу пилкоподібної форми, з різними періодами в діапазонах:

$$\tau_0 \hat{=} [0.7\tau_0^i \dots 1.3\tau_0^i], \quad k_0 \hat{=} [0.7k_0^i \dots 1.3k_0^i],$$

де відповідно τ_0^i та k_0^i їх номінальні значення.

При цьому періоди зміни τ_0 і k_0 під час моделювання вибираються набагато більшими за середній час перехідного процесу викликаного f_k . Це дозволяє за один прогін моделі оцінити ефективність роботи системи при різних поєднаннях параметрів ОК. Характер зміни у часі координатних та параметричних збурень, що діють на об'єкт регулювання, наведено на рис. 8.

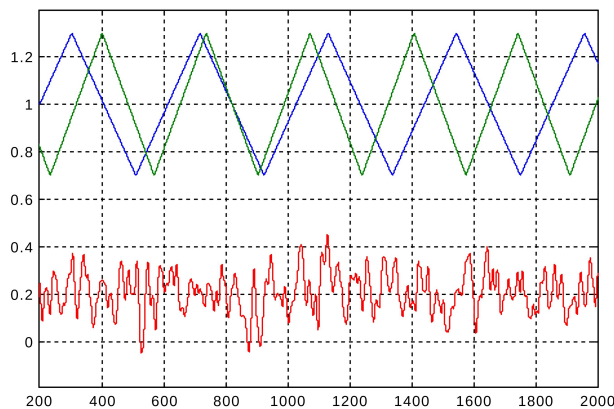


Рис. 8 - Характер зміни в часі координатних та параметричних збурень, що діють на об'єкт регулювання

Fig. 8 - Character of change in time of coordinate and parametric disturbances acting on the control object

Виходячи з основного завдання, яке повинні вирішувати СГК, для порівняльної оцінки якості альтернативних варіантів СГК були прийняті наступні показники:

1) Середнє видалення регульованої змінної від граничного значення:

$$M[y^{гр+} - y(t)] = \frac{1}{T_{\text{мод}}} \int_0^{T_{\text{мод}}} (y^{гр+} - y(t)) dt,$$

де $T_{\text{мод}}$ - час моделювання.



2) Загальна кількість подій S: N_s .

3) Оцінка середньої розрахункової ймовірності відсутності S на інтервалі T:

$$\hat{P}_s^p(T = 100) = \exp\{-T\hat{n}_s^p(T = 100)\}.$$

4) Оцінка середньої фактичної ймовірності відсутності S на інтервалі T:

$$\hat{P}_s^\Phi(T = 100) = \exp\{-100\hat{n}_s^\Phi(T = 100)\},$$

$$\text{де } \hat{n}_s^\Phi = \frac{N_s}{T_{\text{мод}}}.$$

При отриманні динамічних властивостей модуля прогнозування вільного руху для САР, яка входить до складу аналізованих варіантів систем гарантуючого керування, використовуємо схему з рисунка 4, де в якості моделі ОК буде модель САР за каналом $y^{зdd+}$ - y.

Як спрощена модель САР за каналом $y^{зdd+}$ - y була обрана модель третього порядку із запізненням. Параметри цієї моделі прийняті фіксованими такими, щоб її перехідна характеристика представляла певний компроміс між безліччю перехідних характеристик, які ми отримуємо при варіаціях властивостей об'єкта регулювання. Визначення параметрів велось спрощено, евристично, т.к. оптимізаційні процедури недостатньо коректні. Структура спрощеної моделі САР каналом $y^{зdd+}$ - y та її параметри відображені на рис. 9.

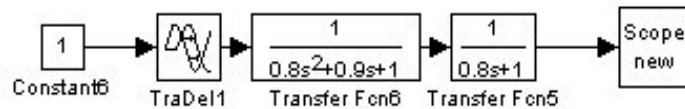


Рис. 9 - Схема моделювання спрощеної моделі САР каналом $y^{зdd+}$ - y
Fig. 9 - Scheme of modeling a simplified model of the ACS channel y^{zdd+} - y

Відповідність перехідної характеристики спрощеної моделі САР і перехідних характеристик САР за каналом $y^{зdd+}$ - y при варіаціях параметрів об'єкта на $\pm 30\%$ ілюструється рис. 10.

На основі розробленої моделі САР за каналом $y^{зdd+}$ - y та у відповідності до структурної схеми (рис.4) отримаємо схему моделювання для модуля прогнозування вільного руху. На рис. 11 представлені схема моделювання модуля прогнозування вільного руху та його перехідна характеристика.

Для наведених висше альтернативних варіантів структурних схем СГК були розроблені схеми їх моделювання у середовищі Simulink та проведено дослідження роботи. На рис. 12 і 13 представлені найповніші варіанти моделей СГК, тобто. такі в яких є обидва блоки прогнозування як модуль прогнозування вільного руху в контурі СГК - МПрСД, так і модуль прогнозування вимушеного руху - МПрВД (прогнозування траєкторії зміни допустимого заданого значення).

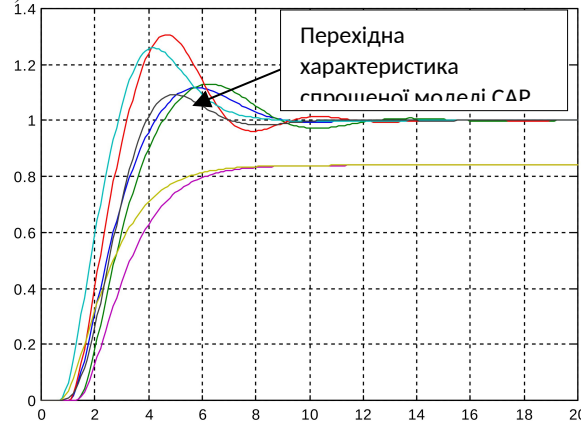


Рис. 10 - Відповідність перехідної характеристики спрощеної моделі САР та перехідних характеристик САР за каналом $y^{зdd+}$ - y при варіаціях параметрів об'єкта

Fig. 10 - Correspondence of the transient characteristics of the simplified ACS model and the transient characteristics of the ACS along the y^{zdd+} - y channel with variations in the object parameters

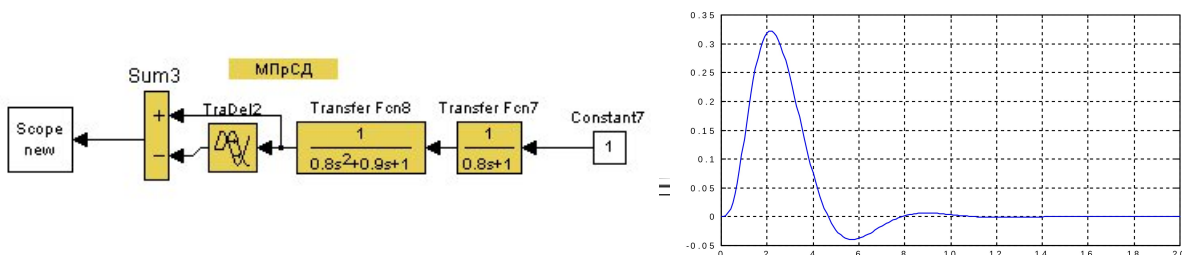




Рис. 11 - Структурна схема модуля прогнозування вільного руху в контурі СГК та його перехідна характеристика
Fig. 11 - Block diagram of the free motion prediction module in the GCS circuit and its transient response

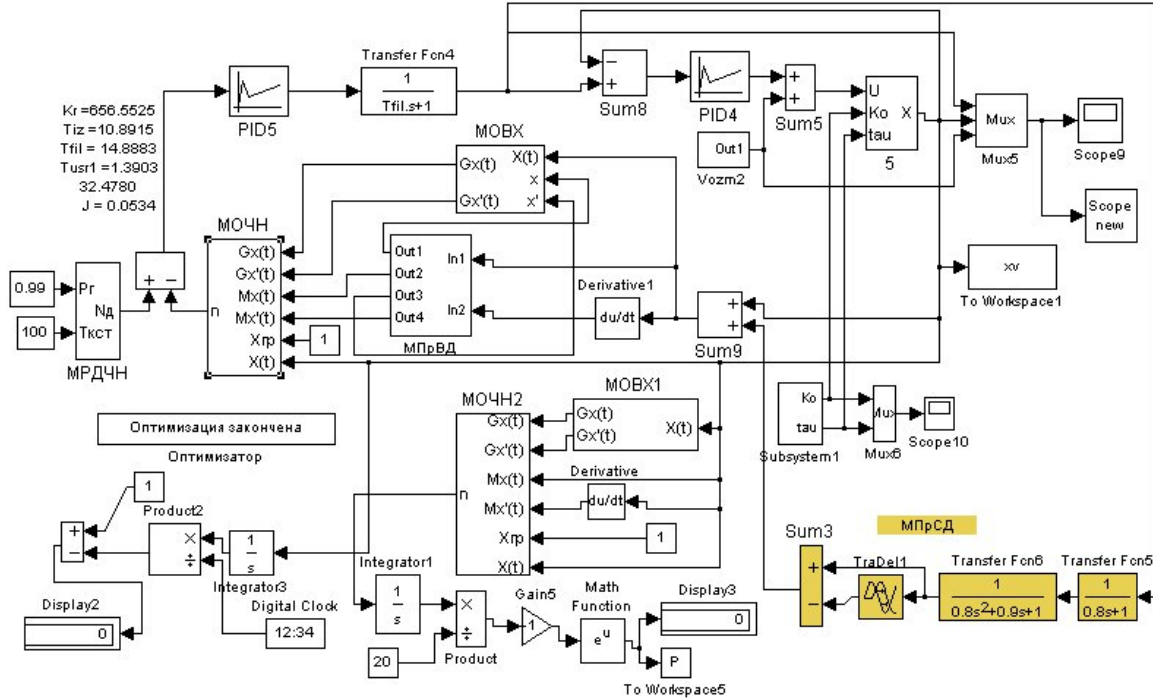


Рис. 12 - Схема моделювання СГК з обчисленням y^{zdd+} контуру регулювання в контурі стабілізації частоти порушень
Fig. 12 - Scheme of modeling of the GCS with calculation of y^{zdd+} of the control loop in the disturbance frequency stabilization loop

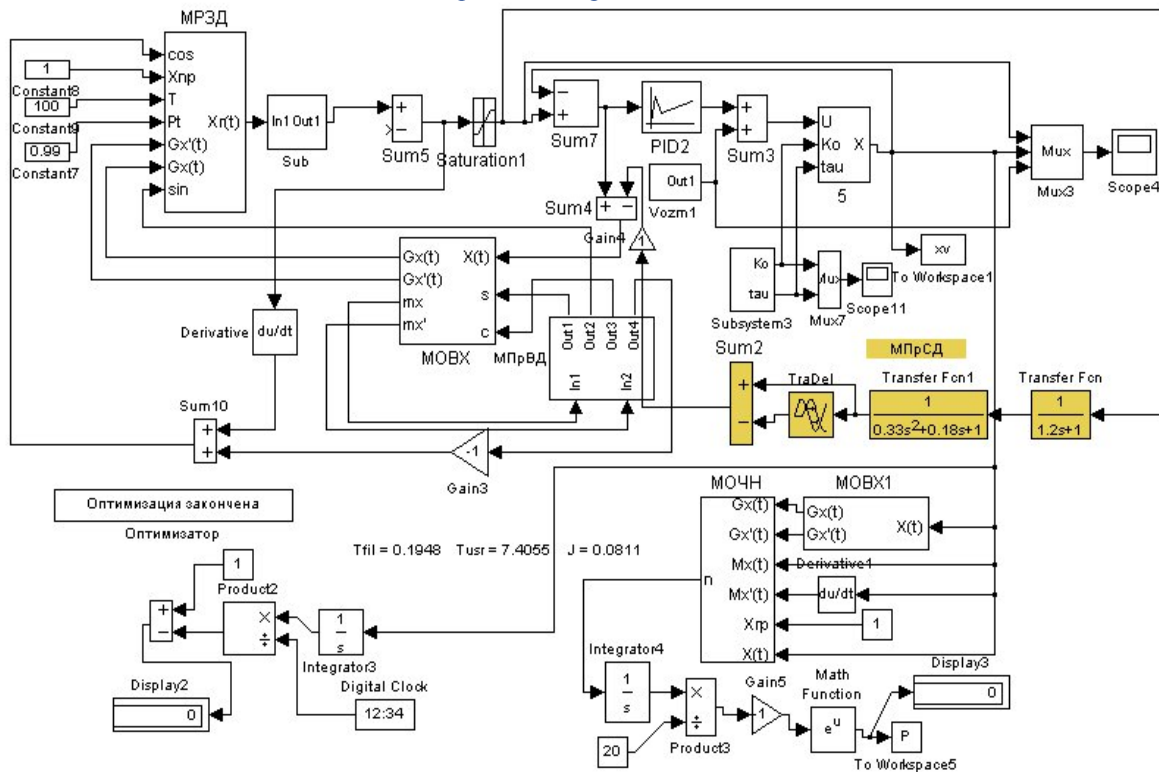


Рис. 13 - Схема моделювання СГУ з розрахунком $y^{здд+}$ контуру регулювання за моделлю порушення регламенту

Fig. 13 - Scheme of modeling of the GCS with calculation of y^{zdd+} of the regulation contour according to the regulation violation model

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати моделювання ілюструються в такий спосіб. На рисунках 14 – 17 представлені фрагменти моделювання всіх альтернативних 8-ми варіантів СГК, обраних для дослідження.

У полях графіків зазначені значення основних показників якості СГК - середнього значення видалення регламентованої змінної від межі значення і оцінка середнього значення розрахункової ймовірності відсутності порушень границь регламенту на інтервалі $T = 100$ одиниць часу.

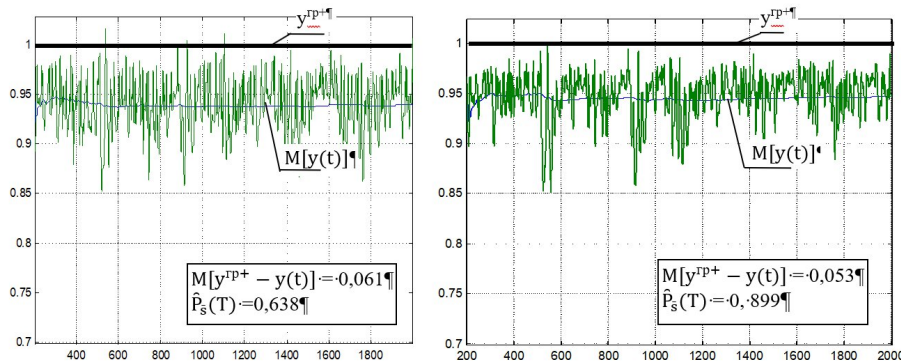


Рис. 14 - Фрагменти моделювання СГК: а) код 1.2.0.2.1.0 без прогнозування траєкторії $y^{здд+}$ та без прогнозування вільного руху; б) код 1.2.2.2.1.0 - з прогнозуванням траєкторії $y^{здд+}$ та без прогнозування вільного руху

Fig. 14 - Fragments of GCS modeling: a) code 1.2.0.2.1.0 without trajectory prediction y^{zdd+} and without free motion prediction; b) code 1.2.2.2.1.0 - with trajectory prediction y^{zdd+} and without free motion prediction

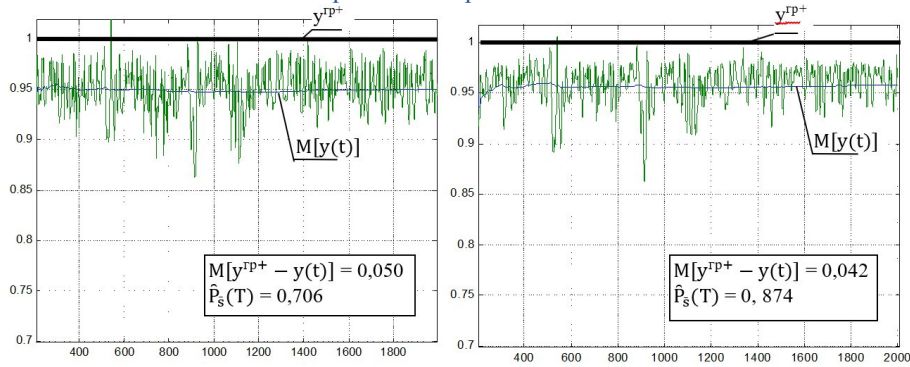


Рис. 15 - Фрагменти моделювання СГК: а) код 1.2.0.2.1.1 без прогнозування траєкторії y^{zdd+} та з прогнозування вільного руху; б) код 1.2.2.2.1.1 - з прогнозуванням траєкторії y^{zdd+} та з прогнозування вільного руху

Fig. 15 - Fragments of GCS modeling: a) code 1.2.0.2.1.1 without trajectory prediction y^{zdd+} and with free motion prediction; b) code 1.2.2.2.1.1 - with trajectory prediction y^{zdd+} and with free motion prediction

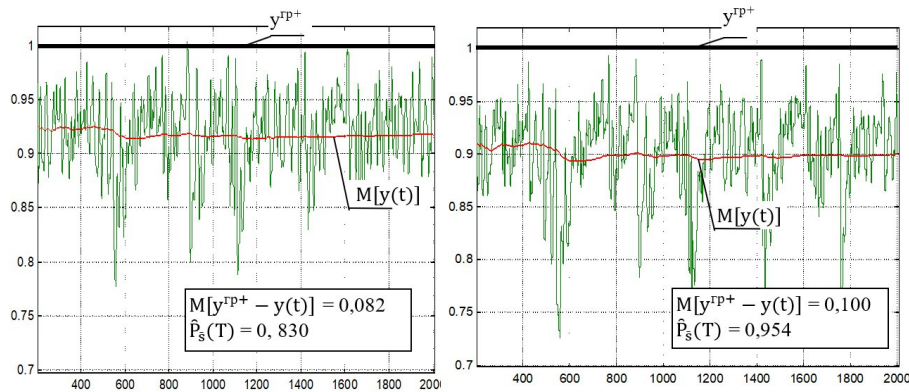


Рис. 16 - Фрагменти моделювання СГК: а) код 2.2.0.1.2.0 без прогнозування траєкторії y^{zdd+} та без прогнозування вільного руху; б) код 2.2.2.1.2.0 - з прогнозуванням траєкторії y^{zdd+} та без прогнозування вільного руху

Fig. 16 - Fragments of GCS modeling: a) code 2.2.0.1.2.0 without trajectory prediction y^{zdd+} and without free motion prediction; b) code 2.2.2.1.2.0 - with trajectory prediction y^{zdd+} and without free motion prediction

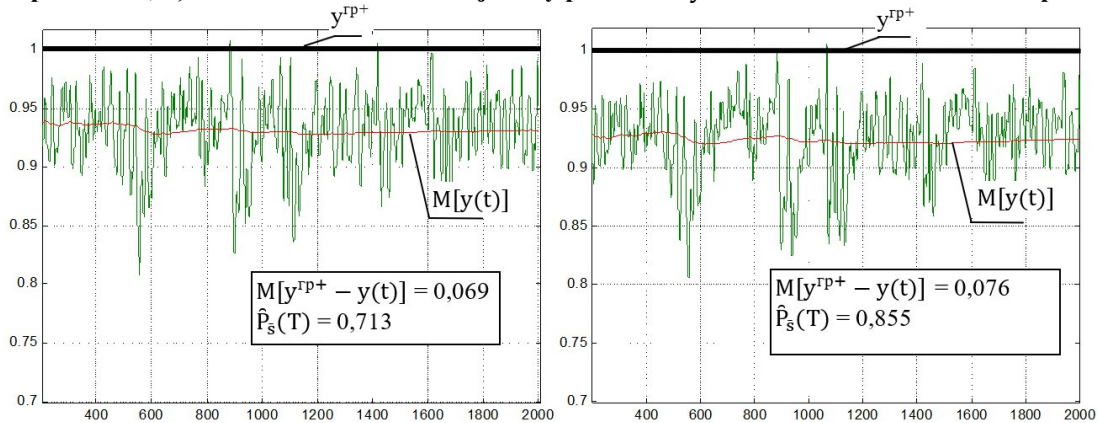


Рис. 17 - Фрагменти моделювання СГК: а) код 2.2.0.1.2.1 без прогнозування траєкторії y^{zdd+} та з прогнозування вільного руху; б) код 2.2.2.1.2.1 - з прогнозуванням траєкторії y^{zdd+} та з прогнозування вільного руху

Fig. 17 - Fragments of GCS modeling: a) code 2.2.0.1.2.1 without trajectory prediction y^{zdd+} and with free motion prediction; b) code 2.2.2.1.2.1 - with trajectory prediction y^{zdd+} and with free motion prediction

Слід зазначити, що оцінка цієї ймовірності велася за тими ж моделями, що були використані в алгоритмах гарантуючого управління, але отримані значення цієї ймовірності значно нижче заданої (гарантованої ймовірності). Це може бути пояснено тим, що в нелінійній системі закони розподілу випадкових процесів $y(t)$ та



$y'(t)$ відрізняються від нормальних. Разом з тим, ймовірність, обчислена за фактами порушення границь (рідкісні події підпорядковуються закону розподілу Пуассона) виявилася значно вище. Однак ці значення ймовірностей також не можна визнати статистично достовірними. Справа в тому, що кількість викидів, на підставі яких проводився розрахунок, мало. виправити ситуацію могло б збільшення часу моделювання до такого інтервалу, на якому кількість викидів було б не нижче 20, тобто час моделювання слід було б збільшити в 10 ... 50 разів. Це супроводжувалося б пропорційним збільшенням часу для проведення машинних експериментів, що небажано.

Але оскільки в даному випадку нас цікавить не абсолютні значення ймовірності, а їх співвідношення для різних систем, то було прийнято рішення скористатися «розрахунковою» оцінкою ймовірності відсутності порушень.

ВИСНОВКИ

Підсумкові результати моделювання зведені в таблицю 2. Важливо, що ефективність СГК повинна оцінюватися за двома різними критеріями, які можуть бути зведені до одного. Тому для судження про переваги та недоліки прогнозування вільного руху в СГК виділимо області компромісів щодо Парето (рис.18). До області компромісів можна віднести лише такі варіанти СГК, у яких поліпшення одного показника щодо інших систем досягається за рахунок погіршення іншого показника.

Таблиця 2 - Значення показників якості СГУ різної структури в режимах, що встановилися ($T_{\text{мод}} = 2000\tau_0$) при змінних параметрах тестового об'єкта управління ($\kappa_0 \in [0.7\kappa_0^H; 1.3\kappa_0^H]$, $\tau_0 \in [0.7\tau_0^H; 1.3\tau_0^H]$)

№	Варіант СГК	Оцінки ймовірностей порушення регламенту		Середнє значення видалення $y(t)$ від граничного значення	Число викидів
		$\hat{P}_s^{\Phi}(T)$ T=100	$\hat{P}_s(T)$ T=100		
1	1.2.0.2.1.0	0.861	0.638	0.061	3
2	1.2.0.2.1.1	0.905	0.706	0.050	2
3	1.2.2.2.1.0	0.951	0.899	0.053	1
4	1.2.2.2.1.1	0.951	0.874	0.042	1
5	2.2.0.1.2.0	0.951	0.830	0.082	1
6	2.2.0.1.2.1	0.905	0.713	0.069	2
7	2.2.2.1.2.0	1,000	0.954	0.100	0
8	2.2.2.1.2.1	0.951	0.855	0.076	1

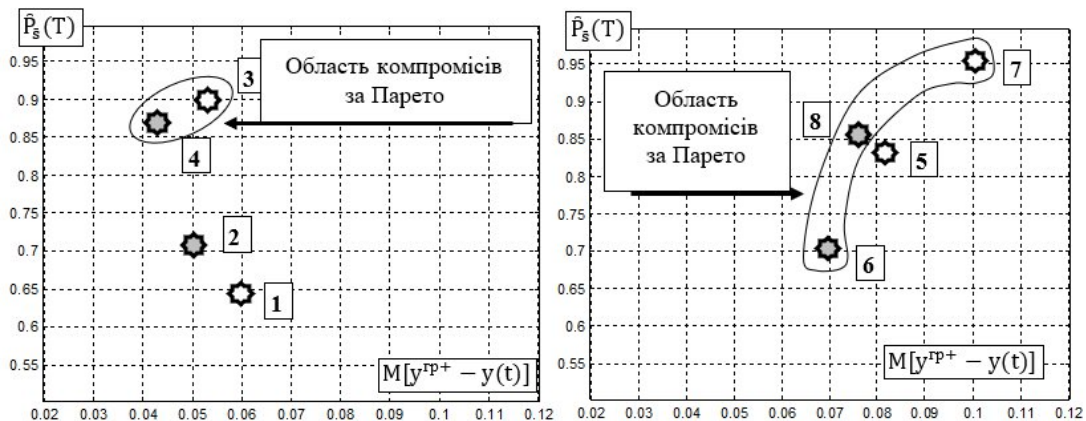


Рис. 18 - Відображення характеристик (див. табл. 2) варіантів СГУ на площинах основних показників якості та виділення областей їх компромісів за Парето

Fig. 18 - Display of characteristics (see Table 2) of GCS variants on the planes of main quality indicators and allocation of areas of their Pareto compromises

Варіанти СГК, що входять в область компромісів є конкуруючими між собою. Вибір конкретного варіанта можливий для конкретної ситуації, коли можна сформулювати переваги щодо того чи іншого показника. Варіанти СГК, які не входять в область компромісів, можна розглядати як неконкурентоспроможні за цими показниками.



Слід зазначити, що якби побудувати загальну область компромісів по Парето для СГК і з розрахунком гарантуючого управління в контурі стабілізації частоти порушень і з його розрахунком за моделлю порушення регламентів, то в цю область увійшли б СГК з номерами 3, 4, 7.

Остаточний висновок можна зробити такий - застосування в СГК прогнозування вільного руху в контурі гарантування дозволяє розширити їх область компромісів за Парето.

ЛІТЕРАТУРА

- [1]. Хобін В.А. Системи гарантуючого керування технологічними агрегатами: основи теорії, практика застосування. – Одеса: ТЕС, 2008. – 304 с.
- [2]. Хобін В.А., Мазур А.В., Степанов М.Т. Енергоефективне гарантуюче керування тепловими та тепло-масообмінними процесами харчових технологій: проблеми, імітаційні моделі, структури та алгоритми САК. – Херсон: Гринь, 2014, 214 с.
- [3]. Степанов М.Т., Хобін В.А. Прогнозування вимушеного руху та його застосування в системах гарантуючого керування, – Одеса, Автоматизація технологічних та бізнес-процесів, № 5, 6, 2011 – с. 20-25.
- [4]. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959
- [5]. Степанов М.Т., Хобін В.А. Система автоматичного регулювання інваріантна до контрольованих збурень з прогнозуванням сигналу корекції по кубічному сплайну // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – Одеса, 2020. – № 1. – Т. 12. – С. 64 – 70.
- [6]. Степанов М.Т. Реалізація керування за прогнозом на основі кубічного сплайну в замкнутих САК: концепція побудови і попередній аналіз роботи // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – Одеса, 2020. – № 4. – Т. 12. – С.4–12.
- [7]. Степанов М.Т. Замкнуті САК з прогнозуванням: аналіз альтернативних варіантів структур // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – Одеса, 2021. – № 3. – Т. 13. – С.38–48. 3.

REFERENCES

- [1]. V.A. Khobin Sistemi garantuyuchogo keruvannya tekhnologichnimi agregatami: osnovi teorii, praktika zastosuvannya. – Odesa: TES, 2008. – 304 s.
- [2]. V.A. Hobin, et al. Energoefektivne garantuyuche keruvannya teplovimi ta teplo-masoobminnimi procesami harchovih tekhnologij: problemi, imitacijni modeli, strukturi ta algoritmi SAK. – Herson: Grin', 2014, 214 s.
- [3]. M.T. Stepanov et al. Prognozuvannya vimushenogo ruhu ta jogo zastosuvannya v sistemah garantuyuchogo keruvannya, Avtomatizatsiya tekhnologichnih ta biznes-protseviv, no.5-6, pp.20-25, 2011.
- [4]. O. J. M. Smith. A controller to overcome dead-time. ISA Transactions, 6 (2):28–33, 1959
- [5]. M.T. Stepanov et al. Systema avtomatichnogo reguluvannya invariantna do kontrolovanix zburen z prognozuvannyam sygnalu korekciyi po kubichnomu splajnu, Avtomatizatsiya tekhnologichnih ta biznes-protseviv, no.1, vol. 12, pp.64-70, 2020.
- [6]. M.T. Stepanov Realizaciya keruvannya za prognozom na osnovi kubichnogo splajnu v zamknutih SAR: koncepciya pobudovi i poperednij analiz roboti, Avtomatizaciya tekhnologichnih i biznes-procesiv, no. 4, vol. 12, pp. 4–12, 2020.
- [7]. M.T. Stepanov Zamknuti SAR z prognozuvannyam: analiz al'ternativnih variantiv struktur, Avtomatizaciya tekhnologichnih i biznes-procesiv, no. 3, vol. 13, pp.38–48, 2021.

Отримана в редакції 01.10.2025. Прийнята до друку 13.10.2025. Received 01 October 2025. Approved 13 October 2025. Available in Internet 30 December 2025