УДК 629.3.025.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук, доц.,
С. П. Маляров,
Р. А. Сайфетдінов,
Г. Є. Янкелевич, канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ З НЕСТАБІЛІЗОВАНИМ ПРИВОДОМ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua
ВАТ "НВК "КЗА ім. Г. І. Петровського", e-mail: kza@g.com.ua

Виконано аналіз можливих способів задання керування у системах стеження із нестабілізованим приводом. Запропоновано найбільш простий щодо витрат на розроблення, виробництво та експлуатацію варіант керування таким приводом та проаналізовано його точнісні характеристики.

Ключові слова: нестабілізований привід, система стеження, наземний рухомий об'єкт.

Постановка проблеми. Останнім часом зростає актуальність створення нових перспективних систем стабілізації корисного навантаження, установлюваного на наземних рухомих об'єктах. Зазвичай такі системи працюють у режимах стеження та стабілізації, а сигнали керування у цих режимах формуються на підставі сигналів гіроскопічних пристроїв про абсолютну кутову швидкість стабілізованого об'єкта. Але в деяких практичних застосуваннях набуває актуальності використання нестабілізованого приводу. При цьому розглядається лише режим стеження і вважається доцільним максимальне спрощення приладового складу системи. Остання обставина зумовлена факторами зменшення витрат на виготовлення та експлуатацію системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальні принципи побудування приводів наведено у багатьох працях [1; 2]. Найбільш повно підходи до створення систем досліджуваного типу подано у праці [3]. До того ж у цій праці досліджено окремо режими стабілізації, стеження та сумісного режиму стабілізації та стеження. Основи детального математичного опису системи, що містить об'єкт керування, виконавчий механізм у вигляді двигуна сталого струму, широтно-імпульсний модулятор, блок керування та гіроскопічний вимірювач кутової швидкості для типової системи стабілізації корисного навантаження, установлюваного на наземному рухомому об'єкті, детально розглянуто у праці [4]. Важливим результатом, поданим у цій праці, є створення об'єднаної моделі об'єкта керування і двигуна, оскільки у реальних системах досліджуваного типу об'єкт керування і двигун пов'язані між собою пружним зв'язком через редуктор. Крім того, у цій праці у математичному описі враховано нелінійність, зумовлену люфтом приводу. Результати дослідження системи стабілізації корисного навантаження, установлюваного на наземному рухомому об'єкті як у режимі стеження, так і в режимі стабілізації наведено у праці [5]. З точки зору створення математичного опису різниця у режимах стеження та стабілізації полягає у відмінностях законів керування. Що стосується організації режимів стеження із стабілізованим і нестабілізованим приводом, то їх відмінності також пов'язані з особливостями керування, які ще не висвітлено у науково-технічній літературі.

Дослідження системи стеження з нестабілізованим приводом. У системах стеження з нестабілізованим приводом забезпечується лише режим стеження. У найпростішому випадку керування таким приводом здійснюється за допомогою сигналу від пульта керування. Але такий підхід до керування приводом не забезпечує достатньої якості процесів керування. Для поліпшення їх якості вважається доцільним використовувати зворотні зв'язки.

У системах стеження досліджуваного типу для організації зворотних зв'язків зазвичай використовують датчики швидкості або прискорення валів двигуна або об'єкта, а також

датчики моменту виконавчого двигуна. Як датчики швидкості можна використовувати тахометри, встановлювані на валу виконавчого двигуна, гіроскопічний датчик кутової швидкості, установлюваний на об'єкті керування та сигнали, пропорційні напрузі ланцюга якоря двигуна. Для організації додаткових коригувальних зворотних зв'язків використовуються сигнали, пропорційні моменту виконавчого двигуна. Це зумовлено тим, що двигун будь-якого типу виробляє фізичну величину, яка може характеризувати величину цього моменту [2]. Для двигунів постійного струму такою величиною може бути струм якоря двигуна. Як датчик моменту, що розвивається виконавчим двигуном, можна використовувати резистор, установлюваний в ланцюзі якоря двигуна. Відомо, що момент двигуна складається з двох складових, одна з яких пропорційна прискоренню двигуна, а друга – моменту збурення. Отже, сигнал, пропорційний моменту збурення, можна виділити із сигналу, пропорційного моменту двигуна. Слід зазначити, що такий спосіб організації керування є найбільш економічним.

Обчислювальну схему системи стеження із нестабілізованим приводом показано на рис. 1. Подана математична модель містить моделі двигуна, об'єкта керування, підсилювача потужності, широтно-імпульсного модулятора та блока керування. Для спрощення математичного опису і відповідно зменшення часу моделювання використовується лінійна модель широтно-імпульсного модулятора.

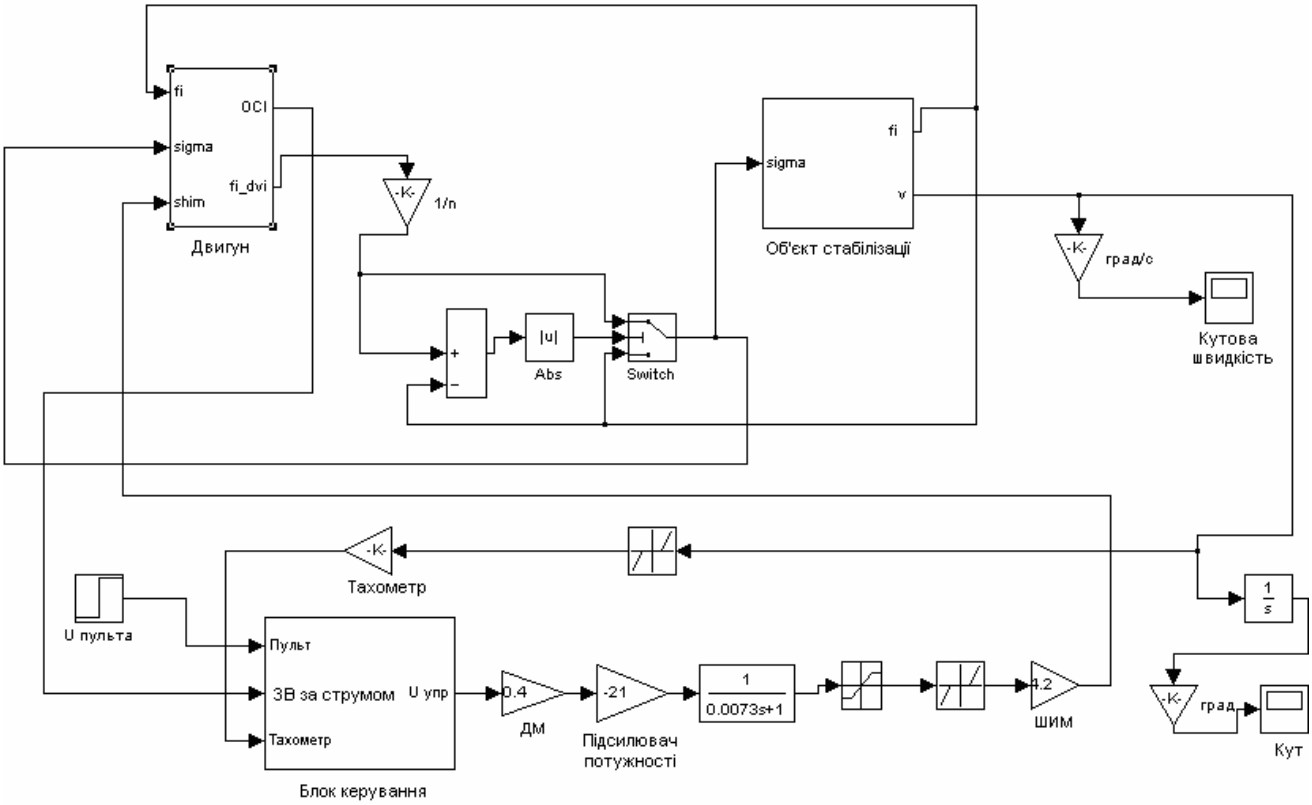
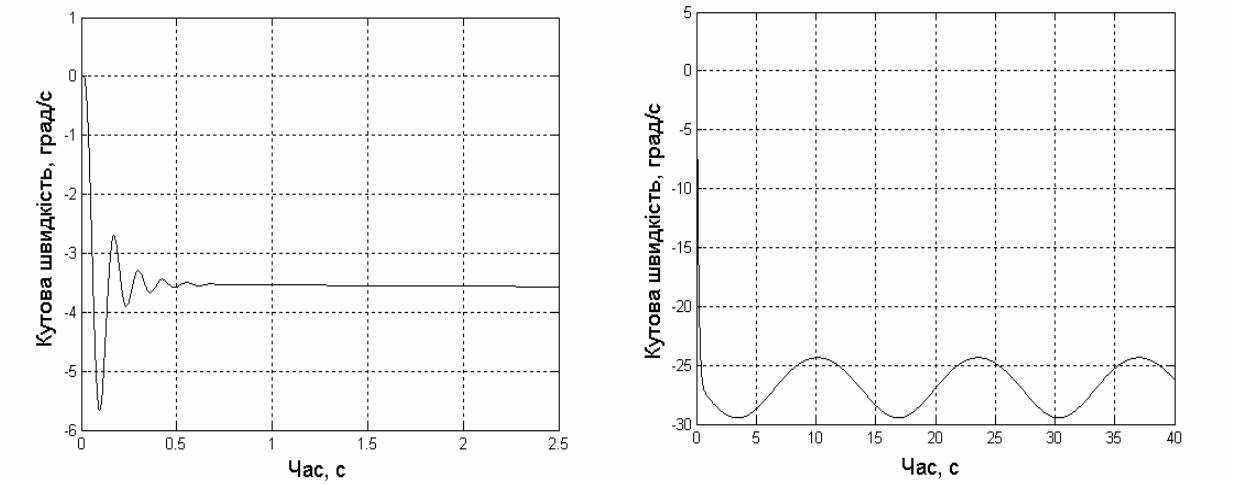


Рис. 1. Обчислювальна схема системи стеження із нестабілізованим приводом

Один зі способів керування системою стеження полягає у використанні сигналів тахометра, пульта керування та зворотного зв'язку за струмом. При цьому на вхід блока керування, тобто регулятора, надходять сигнали від пульта керування $U_{\text{пк}}$, тахометра $U_{\text{тх}}$ та сигналу зворотного зв'язку за струмом $U_{\text{зв}}$. При цьому закон керування буде визначатись виразом

$$U_{\text{кер}} = U_{\text{пк}} + U_{\text{тх}} + U_{\text{зв}}.$$

Результати моделювання процесів відпрацювання кутової швидкості у режимах стеження за умови керування від пульта керування, тахометра та наявності зворотного зв'язку за струмом, а також за умови керування лише від пульта керування та за зворотним зв'язком за струмом показано на рис. 2. Вилучення з процесу керування сигналу тахометра призводять до коливань низької частоти на тривалих проміжках часу.



а *б*

Рис. 2. Результати відпрацювання кутової швидкості нестабілізованим приводом:
а – для керування за сигналами пульта керування, тахометра та зворотного зв'язку за струмом;
б – для керування за сигналами пульта керування та зворотного зв'язку за струмом

За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що найбільшого ефекту використання зворотного зв'язку за струмом можна досягти за умови введення зворотного зв'язку за деяким алгоритмом, який фактично реалізує введення зворотного зв'язку за струмом у моменти зменшення сигналу з пульта керування у такий спосіб, щоб сигнал зворотного зв'язку протидіяв цьому зменшенню. Для практичної реалізації цей алгоритм доцільно реалізовувати засобами логіки.

З метою можливості керування без тахометра з одночасним підвищенням результатів відпрацювання кутової швидкості системою стеження можуть бути розглянуті інші варіанти керування, зокрема керування на підставі оцінки прискорення об'єкта керування під дією двигуна приводу, яка формується цифровим регулятором, тобто для підвищення точності процесів керування використовуються алгоритмічні засоби.

Керувальний момент двигуна, що є виконавчим механізмом системи стеження досліджуваного класу, можна сформувати на підставі виразу

$$M_{\text{дв}} = c_{\text{м}} i_{\text{зв}},$$

де $c_{\text{м}}$ – стала моменту навантаження двигуна; $i_{\text{зв}}$ – струм зворотного зв'язку. Тоді зведений до вихідного вала приводу момент буде таким:

$$M_{\text{в}} = nM_{\text{дв}} = nc_{\text{м}} i_{\text{зв}},$$

де n – передатне відношення редуктора.

У системах досліджуваного типу найчастіше застосовують приводи зі шнековою передачею. Такі передачі характеризуються низьким КПД, який приблизно становить $\eta = 0{,}5$. Отже, з урахуванням типу застосовуваної передачі, тобто з урахуванням її втрат, зведений до вихідного вала приводу момент буде визначатись у такий спосіб:

$$M_{\text{в}} = \eta n M_{\text{дв}}. \quad (1)$$

Співвідношення (1) дозволяє визначити оцінку прискорення об'єкта керування під дією керувального моменту двигуна

$$\dot{\omega} = \frac{M_{в}}{I_{о}} = \frac{nc\eta}{I_{о}} i_{зв},$$

де $I_{о}$ – момент інерції об'єкта керування.

Ефективного керування нестаблізованим приводом у системі стеження можна досягти, якщо отримані оцінки прискорення об'єкта керування проінтегрувати і подати на вхід підсилювача, коефіцієнт підсилювання якого відповідає коефіцієнту передачі тахометра. Одночасно на блок керування подаються сигнал з пульта керування та сигнал зворотного зв'язку за струмом, який забезпечує демпфірування процесу керування.

За апаратурної реалізації сигнал зворотного зв'язку за струмом формується за допомогою датчика Холла. Задача відновлення фактичного значення струму в обмотці двигуна алгоритмічними методами може бути розв'язана за сигналом на виході фільтра низьких частот після АЦП за допомогою коефіцієнта перетворення. Отриману оцінку після інтегрування можна використовувати для формування сигналу, який є аналогом сигналу гіротахометра у попередній схемі керування

$$U_{\omega} = k_{\omega} N \int_{0}^{t} i dt .$$

Виходячи з аналізу експериментальних досліджень, слід зазначити, що для коригування величини струму в обмотці двигуна після фільтра низьких частот у цифрову частину системи стеження доцільно внести коригувальну ланку.

Використання в алгоритмах оцінювання прискорення об'єкта керування параметрів двигуна і редуктора потребує регулювання коефіцієнтів і введення в закон керування сигналу, пропорційного отриманій оцінці швидкості об'єкта керування.

Закон керування з використанням сигналу, пропорційного оцінці швидкості об'єкта керування, можна сформувати у вигляді

$$\delta = k_1 U_{пк} + k_2 U_{\omega} - k_3 f(i_{зв}) .$$

де $U_{пк}$ – сумарний сигнал пульта керування.

Швидкість відпрацювання кутової швидкості визначають сумою сигналів $U_{пк}$ та U_{ω}:

$$v = k_1 U_{пк} + k_2 U_{\omega} = k_1 U_{пк} + k_2 k_{\omega} N \int_{0}^{t} i dt .$$

За умови досягнення об'єктом керування швидкості, яка відповідає сигналу пульта керування, величина v буде дорівнювати нулю, тобто

$$k_1 U_{пк} = -k_2 k_{\omega} N \int_{0}^{t} i dt .$$

Із цього виразу випливає, що для сталого значення $U_{пк}$ складова U_{ω} не буде змінюватись, тобто звичайне підсумовування сигналів з пульта керування та сигналу, що відповідає оцінці швидкості об'єкта керування, не дозволяє забезпечити необхідні швидкості відпрацювання кутової швидкості.

Для усунення цього недоліку необхідно до законів керування ввести додатковий сигнал, який дорівнює інтегралу від сумарного сигналу пульта керування та оцінки швидкості об'єкта керування

$$\delta_1 = k_1 U_{пк} + k_2 U_{\omega} .$$

Результати моделювання за пропонованим законом керування подано на відповідних графіках (рис. 3).

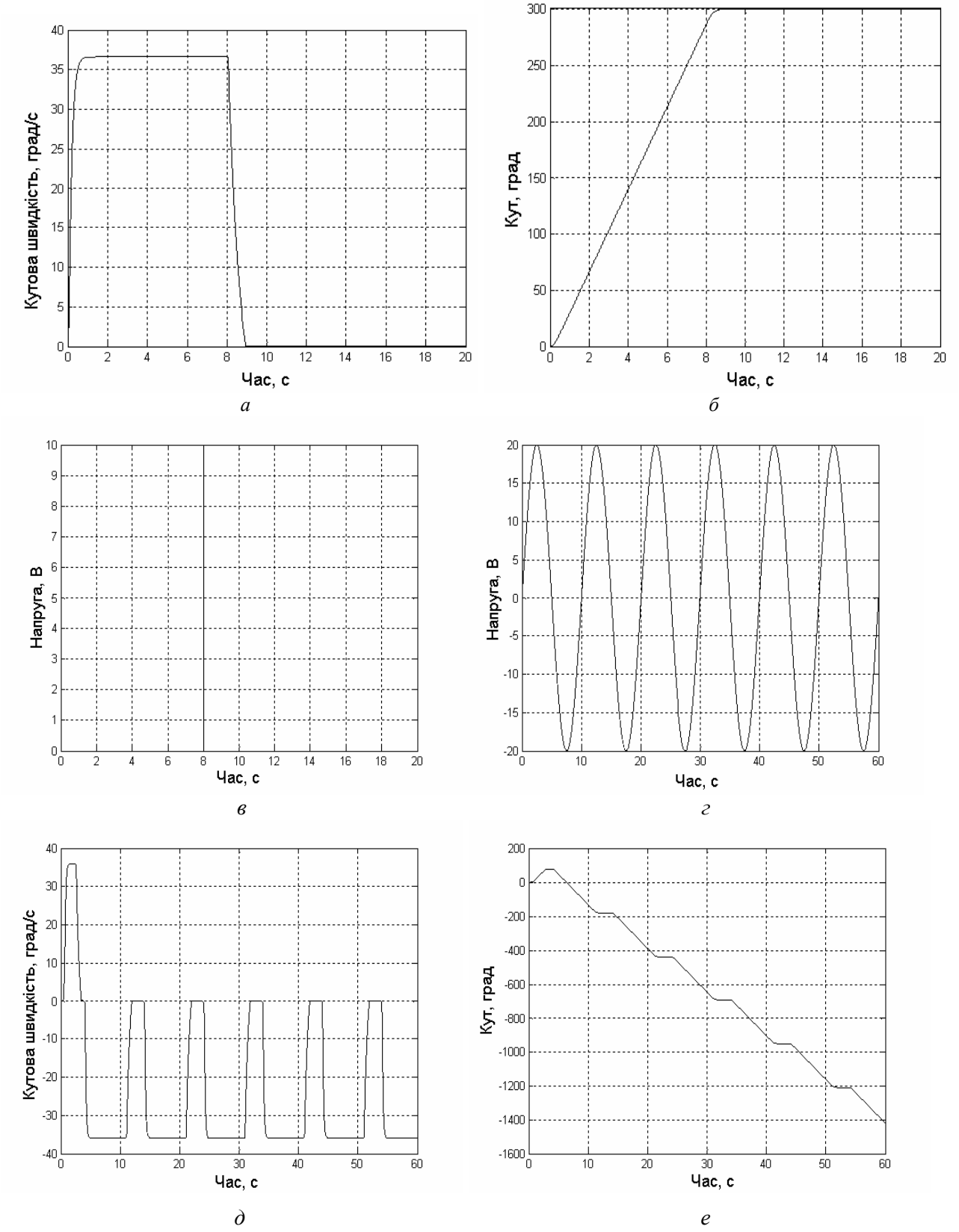


Рис. 3. Результати відпрацювання кутової швидкості для стрибкоподібного сигналу: *а* – кутова швидкість; *б* – кут; *в* – сигнал пульта керування та для синусоїдального сигналу; *г* – сигнал керування; *д* – кутова швидкість; *е* – кут

Процес інтегрування здійснюється до досягнення сигналом δ_1 нульового рівня. Після цього необхідно підтримувати постійний рівень сигналу інтегратора за умови постійного сигналу з пульта керування.

Висновки. Визначено особливості керування нестабілізованого приводу. Запропоновано декілька варіантів такого керування та подано відповідні результати моделювання.

Список літератури

1. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. *Следящие* приводы / под ред. *Б. К. Чемоданова*. – М.: Энергия, 1976. – Кн. 1. – 480 с.
3. *Кочергин В. В.* Следящие системы с двигателем постоянного тока.– Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
4. *Сущенко О. А.* Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта / О. А. Сущенко, Р. А. Сайфетдінов // Електроніка та системи управління .– К.: НАУ 2207.–№3(13). – С. 146 – 151.
5. *Сущенко О. А.* Особливості та результати моделювання стабілізатора рухомого наземного об'єкта / О. А. Сущенко, С. П. Маляров, Г. Є. Янкелевич, Р. А. Сайфет-дінов // Вісник НАУ. – 2007. – № 3 – 4. – С. 9 – 15.

О. А. Сущенко, С. П. Маляров, Р. А. Сайфетдінов, Г. Є. Янкелевич

Исследование системы слежения с нестабилизированным приводом

Выполнен анализ возможных способов задания управления в системах слежения с нестабилизированным приводом. Предложен наиболее простой с точки зрения затрат на разработку, производство и эксплуатацию вариант управления таким приводом и проанализированы его точностные характеристики.

O. A. Sushchenko, S. P. Malyarov, P. A. Sayfetdinov, G. E. Yanklevich

Research of tracking system with non-stabilized drive

Analysis of possible ways to give control action in the tracking system with non-stabilized drive is carried out. The simplest from the point of view of costs for development, production and exploitation variant for such drive is suggested and its accuracy characteristics are studied.