УДК 007

В.М. Лисогор, проф., д-р техн. наук,
Вінницький державний аграрний університет
О.М. Циганенко, інж., С.В. Сорокун, асистент
Кіровоградський національний технічний університет

Моделі контролю групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів

Проаналізовані та дослідженні ряд моделей контролю ефективності групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів для відповідних схем з’єднання, окремих операторів з їх технічними засобами.
модель, контроль, управління, людино-машинні системи, оператор, групова взаємодія, рівняння контролю, рівняння стану

Швидкий розвиток науки і техніки привів до розробки величезної кількості механізмів, які використовуються в багатьох галузях промисловості та сільського господарства. З ростом виробництва машин з’явилася складність щодо їх управління. На теперішній час, відомо багато моделей контролю поведінки окремого оператора людино-машинних систем у просторі станів. Але невідомі публікації досліджень моделей контролю групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів, а також публікацій, які розкривають дане питання, взагалі відсутні. Тому, дана публікація відображає сучасний етап розвитку людино-машинних систем і є актуальною.

Метою даної роботи є дослідження моделей контролю групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів.

Пропонується розглянути клас моделей, які діють як у часових так і у частотних областях. В цих моделях передбачається, що людина-оператор діє у відповідності з визначеним критерієм оптимальності і в умовах деяких обмежень.

Зараз цей клас моделей широко використовується та набуває важливого значення. Методи теорії оптимального управління на основі змінних стану («сучасній» теорії) призводять до необхідності використовувати більш складніший математичний апарат. Але данні методи можуть не підходити до тих дослідників, які віддають перевагу більш інтуїтивним підходам. Як стверджують Т.Б. Шерідан, У.Р. Феррелл [1], дуже важливо, щоб вчені та інженери, які вивчають системи людина-машина, віддавали перевагу підходу, який базується на змінних стану, так як він полегшує використання математичного апарату оптимального управління та має добрий вплив в ситуаціях з багатьма змінними. Більш докладно питання теорії оптимального управління розглядається у працях Атанса і Фальба [2], Сейджа [3] та Брайтона і Хо [4].

1.Виклад основних результатів.

Розглядаючи змінні стану припустимо, процес, яким керують, описується системою звичайних диференційних рівнянь першого порядку. Диференційовані змінні називаються змінними стану, а решта змінними управління.

Така система рівнянь першого порядку, може бути отримана завдяки перетворенням кожної похідної диференційного рівняння n-порядку в змінну стану. Якщо маємо n-змінних стану, для n-незалежних лінійних диференційних рівнянь такого типу, то процес, яким керують може бути представлений в загальній «канонічній» формі:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \tag{1}$$

де $x(t) = [x_1; x_2; ... x_n]^T$ - вектор стану зі змінними стану $x_1, ... x_n$;

$u(t) = [u_1; u_2; ... u_n]^T$ - вектор управління зі змінними управління $u_1, ... u_n$;

T- індекс транспонування.

Процес, яким керують представляється у вигляді матриць:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} ... & A_{1n} \\ A_{n1} ... & A_{nn} \end{bmatrix}; \qquad B = \begin{bmatrix} B_{11} ... & B_{1m} \\ B_{n1} ... & B_{nm} \end{bmatrix}.$$

Розглянемо приклад для недемпфірованого гармонійного осцилятора:

$$\ddot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = u(t), \tag{2}$$

де z - змінна стану x_1;

$\dot{z}$ - змінна стану x_2; тоді.

$$\dot{x}_1 = x_2; \quad \dot{x}_2 = -\omega_0^2 x_1 + U. \tag{3}$$

У векторній формі дане рівняння буде мати вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U. \tag{4}$$

У загальному випадку змінні *y(t)*, які спостерігає регулятор (т.б. пред'являються людині-оператору), можуть не співпадати зі змінними стану, тому необхідно ввести додаткове співвідношення у вигляді рівняння контролю, яке має вид:

$$y(t) = Cx(t), \tag{5}$$

де $C = \begin{bmatrix} C_{11} ... & C_{1k} \\ C_{k1} ... & C_{nk} \end{bmatrix}.$

2. Оптимальне управління.

Оптимальним регулятором називається такий регулятор, який при заданому процесі, який керується, при заданих обмеженнях по точності, з якою він може регіструвати змінні стану, при заданій кількості енергії або часу, які можуть бути використанні при регулюванні, та діяти так, щоб мінімізувати деякий критерій якості або функцію вартості з урахуванням їх власних обмежень.

Критерій визначається, як лінійна квадратична функція помилки

$$e = x_E(t) - x(t); \quad e = \tilde{x}(t), \tag{6}$$

де $\tilde{x}(t)$- нев'язка;

$x_E(t)$- еталонне значення змінної стану.

Даний критерій у вигляді квадратичної функції використовується виходячи з наступних причин:

1) при квадратичному критерії рішення припускає аналітичне дослідження;
2) рішення ,яке мінімізує квадратичний критерій, наприклад:

$$J = \int \left[e^2(t) + u^2(t) \right] \cdot dt \to \min. \tag{7}$$

Ідея оптимальної моделі дуже приваблива, яка передбачає, що людина оператор, є достатньо натренована, знає свої особисті динамічні характеристики, динамічні характеристики процесу, яким вона керує, статистичні характеристики своєї особистої варіабельності та зовнішніх збурень. Крім цього критерій, який описує найкраще управління, тобто співвідношення між помилкою та керуючим впливом, і можливо час, якщо задача не представляє собою управління стаціонарним процесом.

Таким чином, якщо оператор – розумна людина, то скоріш за все він зробить спробу діяти оптимально, максимально використовуючи свої здібності розпізнавати та запам'ятовувати сигнали та видавати найкращі керуючи впливи.

Враховуючи, що оптимальне управління для заданих процесів, якими керують та функції критерію можуть бути визначені, є можливість визначити та виміряти відхилення дій людини від ідеального еталона. Дуже часто модель оптимального управління містить в собі деякі вільні параметри, які налагодженні таким чином аби максимально забезпечити відповідність експериментальним даним. При такій відповідності можна зробити деякі припущення: якщо дані отримані для оптимального по заданому критерію регулятора, то найбільш вірогідно, що обмежуючи параметри мають наступні значення.

Існує форма моделювання, яка базується на зоротній задачі оптимального управління. Замість того, щоб характеризувати людину-оператора, порівнюючи з оптимальною поведінкою для даної задачі управління, який включає чітко визначений критерій, людина заздалегідь приймається оптимальною, відносно деякого критерію. Тоді задача полягає у тому, щоб визначити вид цього критерію. Замість того, щоб бути властивістю даної задачі, критерій є властивість регулятора (людини-оператора).

3. Синтез оптимальних регуляторів.

Припустимо, що закон управління має лінійний вид:

$$u(t) = -Lx(t) \quad . \tag{8}$$

Для попереднього прикладу недемпфірованого гармонійного осцилятору, задаючи обернений зв'язок по зміним стану x_1 та x_2 отримуємо:

$$u = -l_1 x_1 - l_2 x_2 , \tag{9}$$

де $x_1 = z$ і $x_2 = \dot{z}$; звідки:

$\ddot{z} = -\omega_0^2 z - l_1 z - l_2 \dot{z}$, або

$$\ddot{z} + l_2 \dot{z} + (\omega_0^2 + l_1) z = 0 \, . \tag{10}$$

Тоді характеристичне рівняння буде мати вид:

$$\lambda^2 + l_2 \lambda + (\omega_0^2 + l_1) = 0 , \tag{11}$$

де l_1 та l_2 – підбираються таким чином, щоб отримувати бажану поведінку, яка б відповідала будь-якому критерію оптиальності, оскільки

l_1- визначає коефіцієнт демпфірування;

l_2- визначає відповідну частоту.

Загальним методом визначення матриці $\boldsymbol{L}$ коефіцієнтів підсилення регулятора є використання умовмінімізації інтегралів квадратичної функції $\boldsymbol{x}$ та вектора $\boldsymbol{u}$. Така функція називається функціоналом критерія:

$$J(u) = \frac{1}{T} \int_0^T \left(x^T Q x + u^T R u \right) \cdot dt \to \min \, . \tag{12}$$

Така схема рішення вимагає більш точнішого вимірювання всіх зміних стану, а це неможливо. Існує інший підхід, який базується на відновленні змінних стану шляхом вводу $u(t)$, в модель процесу, яким керують.

Для даного методу можемо записати:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t), \tag{13}$$

де ^ - змодельоване значення змінної (оцінка).

Для розімкненого відновлювача повина виконуватися умова, що A, B, $u(t)$, $x(t)$ - відомі величини.

Замкнений поновлювач, можна отримати шляхом додавання до розімкненого поновлювача операції над $\left(x(t) - \hat{x}(t) \right)$. Оскільки $y(t) = Cx(t)$ є найкращім вимірюванням, яке можливо отримати для *x(t)*, то ця операція в загальному випадку приймає вид операції *G* над $C\left(x(t)-\hat{x}(t)\right)$.

Таким чином:

$$\dot{\hat{x}}(t)=A\hat{x}(t)+Bu(t)+GC\left(x(t)-\hat{x}(t)\right). \quad (14)$$

Віднявши основне рівняння стану (11) від цього рівняння одержимо:

$$\left(\dot{\hat{x}}(t)-\dot{x}(t)\right)=A\left(\hat{x}(t)-x(t)\right)-GC\left(\hat{x}(t)-x(t)\right)=\left[A-GC\right]\left(\hat{x}(t)-x(t)\right). \quad (15)$$

Тепер необхідно вибрати ***n*** складових ***G*** так, щоб рівняння стало стійким. Для цього дійсні частини його коренів повинні бути від'ємними, тоді:

$$\left(\hat{x}(t)-x(t)\right)\to 0 \quad \left(\dot{\hat{x}}(t)-\dot{x}(t)\right)\to 0 \text{ при } t\to\infty . \quad (16)$$

Об'єднавши два попередніх підходи ми використовуємо для вектору управління в загальному вигляді рівняння:

$$u(t)=-L\hat{x}(t). \quad (17)$$

Цей метод представлений у вигляді схеми на рис.1,а – для простого гармонійного осцилятора, а більш у більш загальній формі – рис.1,б.

Характеристичне рівняння четвертого порядку, для системи рівнянь управління гармонійним осцилятором, рис.1,а, поділяється на два рівняння другого порядку, або:

$$\left[\lambda^2+l_2\lambda+\left(\omega_0^2+l_1\right)\right]\cdot\left[\lambda^2+G_1\lambda+\left(\omega_0^2+G_2\right)\right]=0. \quad (18)$$

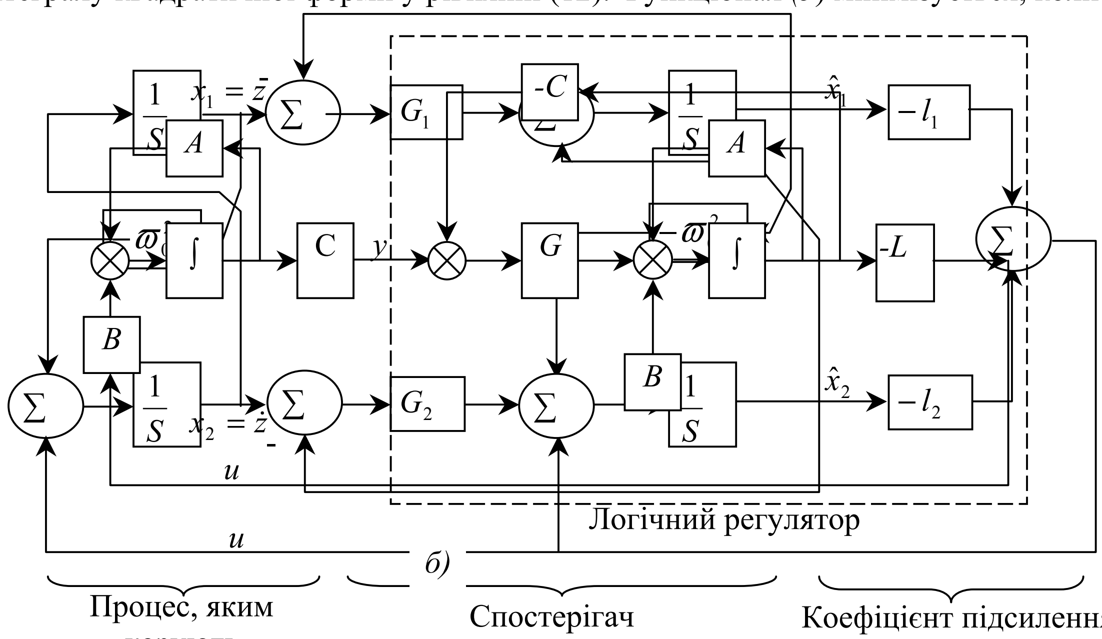
Можливість розділення коефіцієнтів підсилення спостерігача та зворотнього зв'язку дозволяє конструювати такі елементи окремо.

Розглянуті вище системи були повністю детерміновані, тому для застосування до реальних систем, якими керують люди, ці методи можуть бути використані у випадку лінійних інваріантних у часі стаціонарних систем зі збуренням (у вигляді шуму). Виходячі з цього маємо:

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+v(t), \quad (19)$$

де *v(t)* – збурення ("білий шум").

У випадку наявності шумів *(J)* розраховується, як математичне очікування інтегралу квадратичної форми у рівнянні (12). Функціонал *(J)* мінімізується, коли:



а)

а) – детальна блок схема для гармонійного осцилятору; б) загальна форма

Рисунок 1 - Зворотній зв'язок, який відновлює змінні стану, для простого гармонійного осцилятору

$$u(t) = -R^{-1}B^T Kx(t), \qquad (20)$$

де K – є єдиним рішенням алгебраїчного рівняння Ріккаті [1]:

$$KA + A^T K + Q - KBR^{-1}B^T K = 0. \qquad (21)$$

Аналіз, який описується вище, можна використовувати у випадку “кольорового шуму”, коли припускається, що “білий шум” фільтрується для одержання заданого шуму. Фільтр розглядається, як частина заданого динамічного процесу, та набір змінних стану відповідно збільшується.

Новизна запропонованих моделей контролю групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів полягає у розробці та дослідженні відповідних схем контролю вектору вихідних координат на основі диференційних рівнянь стану та векторного квадратичного критерію якості за оцінкою ефективності групової взаємодії.

У результаті аналізу та дослідження моделей контролю ефективності групової взаємодії операторів людино-машинних систем управління у просторі станів, запропоновано функцію управління об’єктами, що здійснюється на основі векторного критерію якості, та диференційні рівняння стану, для відповідних схем з’єднання окремих операторів з їх технічними засобами, де компонентами векторного контролю, є оператори.

Список літератури

1. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек-машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором: Пер. с англ./Под ред. К.В. Фролова. - М.: Машиностоение, 1980.-400 с., ил.
2. Athans, M., and Falb, P. L., 1966. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications. New York: McGraw-Hill.
3. Sage, A., 1968. Optimum Systems Control. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
4. Bryson, A. E., and Ho, Y. C., 1969. Applied Optimal Control. Waltham, Mass-Blaisdell.

Проанализированные и исследованные ряд моделей контроля эффективности группового взаимодействия операторов человеко-машинных систем управления в пространстве состояний для соответствующих схем соединения, отдельных операторов с их техническими средствами.

Analysed and investigational row of models of control of efficiency of group co-operation of operators of the cheloveko-mashynnykh control systems in problems space for the proper charts of connection, separate operators with their hardwares