

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
Факультет денної форми навчання

Кафедра електронних приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ОПТИМАЛЬНИМ ЗА
ШВИДКОДІЄЮ**

Виконав

студент групи ЕІс–71к

Д.В. Бабич

Керівник

ст. викл. к.т.н

В.І. Васильєв

Нормоконтроль

ст. викл. к.т.н

О.Д. Динник

Конотоп 2021

РЕФЕРАТ

В роботі розглянуті принципи оптимізації керування за критерієм швидкодії електроприводу на прикладі складних систем автоматично регульованого запобіжного гальмування шахтної підйомної установки.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є аналіз відомих методів контролю параметрів руху ліфтових систем для переміщення людей і вантажів.

Метою роботи є дослідження сучасних підйимально-транспортних технологій, засобами контролю руху для забезпечення необхідними параметрами впливу, за законами керування що забезпечують комфортні умови переміщення, безпеку і довговічність системи.

У результаті проведених досліджень встановлені шляхи виконання перелічених вище умов на основі сучасних технічних рішень із застосуванням комп'ютерних технологій і досягнень електронної промисловості. Використання їх при проектуванні дає можливість створення якісних систем контролю, автоматизувати керування рухом ліфту з компенсацією впливів пружної частини системи на рух ліфту.

Сучасні системи підйому переміщують вантажі зі швидкістю до 10 м/с. При цьому автоматизовані системи керування ліфтами повинні забезпечувати комфортні режими руху по параболічним трапецеїдальним законам, які передбачають плавний по вогнутої параболі початок прискорення руху, перехід по опуклої параболі на рівномірний рух і умовно симетричні режими уповільнення до зупинки в кінці руху.

Робота викладена на 33 сторінках, у тому числі включає 8 рисунків, - таблиць, список цитованої літератури із 26 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РОЗПОДІЛЕНІ І ЗОСЕРЕДЖЕНІ ПАРАМЕТРИ, ПІДЙИМАЛЬНА УСТАНОВКА, АВТОМАТИЧНО РЕГУЛЬОВАНЕ ЗАПОБІЖНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, ПРУЖНА ЧАСТИНА ПІДЙОМУ

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПОНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ	
1.1 Постановка завдання оптимального програмного керування	7
1.2 Критерії оптимальності	8
1.3 Обмеження координат	9
1.4 Завдання програмного керування	10
РОЗДІЛ 2 ОПТИМАЛЬНІ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	12
2.1. Математичне моделювання технічних систем за класичними законами механіки.....	12
2.2. Моделювання складних систем методом багатокординатного керування	16
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ	23
3.1 Дослідження моделі підйому з розподіленими параметрами	23
3.2 Синтез пристрою, що задає режим руху	25
ВИСНОВКИ	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Бурхливий розвиток комп'ютеризації і комп'ютерних технологій можуть ефективно вирішувати моделювання майбутніх високоякісних і надійних систем підйому. При цьому вирішуються завдання як аналізу систем, так і синтезу керувань ними, шляхом визначення синтезованих структур коригування процесами та їх параметрів.

Для розуміння проблем, з якими стикаються дослідники та розробники нової техніки при розробці систем управління шахтних підйомних машин або модернізації їх систем управління, розглянемо основні технічні характеристики сучасних підйомів.

Глибина сучасних шахтних підйомів досягла 2000 м, вантажопідйомність судин - 75 т, маса канатів досягає 30 т, швидкість підйому - 20 м/с, потужність електроприводів - 5-10 тис. квт. Разом зі зниженням матеріаломісткості та зниження коефіцієнта масивності обладнання ці чинники привели до істотного впливу пружної частини підйомної установки (канати з судинами) на динаміку підйому. Зокрема, при зупинці підйомної машини механічним гальмом на глибині підйому 1000 м амплітуда коливань кінцевих вантажів досягає 1 м.

На НВО "Червоний металіст" (м Конотоп) спільно з ВО "Донецькгірмаш" проводилися дослідження, розробку і впровадження в серійне виробництво систем автоматично регульованого запобіжного гальмування (АРЗГ) шахтних підйомних установок (ШПУ) з глибиною підйому до 1000 м. Також проводилися дослідження відповідно до міжгалузевої програми по створенню та вдосконаленню високопродуктивних технологічних комплексів центральних стовбурів шахт глибиною до 2000 м. Досвід розробки і успішного впровадження систем для глибин до 1000м дав підстави для розробки систем для більш глибоких підйомів до 2000м. Такі системи вже існують на деяких шахтах світу. Рішення поставлених завдань не можуть обійтися без спеціальних технологій по оптимізації керування електроприводом з урахуванням інерційних властивостей виконуючих механізмів в робочих режимах и особливо в аварійних режимах, як наприклад, автоматично регульованого запобіжного гальмування .

З теорії стійкості і оптимальних систем відомо, що якість перехідного процесу визначають параметри передавальної функції об'єкта управління, а перехідний процес може вважатися оптимальним, якщо в будь-який момент часу хоча б одна з змінних досягає обмеження. Якість перехідного процесу може бути забезпечене введенням в структуру системи управління пристрою, що задає, формує оптимальний за динамічними параметрами закон впливу на об'єкт управління.

Основні вимоги до підймальних установок – це безпека, надійність, плавність прискорення, плавність руху і гальмування, точність зупинки кабіни, а також робота ліфта не повинна супроводжуватися високим рівнем шуму. В останній час спостерігається розвиток пасажирських підйомників - ліфтів для індивідуальних житлових будинків, оскільки цей механізм не тільки робить життя легшим, а робить його більш зручним, але іноді вкрай важливо, на прикладі людей з обмеженими можливостями, для рухатися самостійно. На додаток до звичайних ліфтів та ескалаторів на заводах виробляють спеціальні підйомні механізми для осіб з обмеженими фізичними можливостями, які встановлюються в громадських будівлях, будинках, машинах, залізничних вокзалах, автобусах. Великою популярністю користуються панорамні ліфти, коли прозорою є не тільки кабіни підйомника, але і шахта всередині якої ходить ліфт.

Основна перевага вертикального транспорту – мала площа, яку займає його обладнання в будівлі.

В той же час бурхливо розвивається високо поверхове будівництво, що ускладнює деякі режими роботи підймальних установок. Особливо при збільшенні швидкостей переміщень при необхідності підтримки комфортних умов руху на усіх режимах циклу роботи.

З ростом кількості випущених підйомників вдосконалюється і їх конструкція. Особливість ліфтів полягає в тому, що вони являють собою ізольовану автоматизовану систему, діючу циклічно по командам пасажирів. При цьому всі операції з доставки пасажирів на необхідний поверх і по забезпеченню безпеки перевезень виконуються автоматично. Обслуговуючий персонал – електромеханіки по ліфтах, ліфтери-обхідники, диспетчери і чергові електромеханіки ЛАС.

У даній роботі передбачається розглянути проблеми і їх вирішення які виникають в процесі розробки системи керування високо ефективними підймальними установками глибоких шахт і ліфтів висотних будівель. А саме, 1) вертикальними багатоканатними врівноваженими із ведучим шківом тертя і електроприводом вгорі, 2) похилими установками з кутом 15-20 градусів і більше, які використовуються на фунікулерах і деяких вугільних шахтах Донбасу.

РОЗДІЛ 1

ПОНЯТТЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Постановка завдання оптимального програмного керування

1. Розглянемо одновимірний об'єкт керування [1], рух якого описується рівнянням

$$\dot{x} = \varphi(x, u, t) \quad (1),$$

де x - стан об'єкта,

u - управління,

φ - задана функція, яка передбачається безперервної і необхідне число раз диференціювання по x , u і t .

У рівнянні (1) управління є невідомою функцією часу, яка визначається виходячи з таких умов.

а) Визначено початковий і кінцевий стан об'єкта управління

$$x(t_0) = x_0, \quad (2)$$

$$x(t_1) = x_1, \quad (3)$$

де t_0 и t_1 – час початку і кінця функціонування об'єкту.

Часто крайові умови (2) і (3) мають більш загальний вигляд:

- моменти часу t_0 і t_1 , не задані (або один з них не заданий), тоді говорять про завдання з нефіксованим часом;

- не задано початковий стан x_0 (завдання з вільним лівим кінцем траєкторії) з фіксованим або нефіксованим часом;

- не задано кінцевий стан x_1 (завдання з вільним правим кінцем);

- не задані x_0 і x_1 , але задані їх безлічі можливих значень (завдання з рухомими кінцями).

б) Ефективність управління оцінюється за допомогою інтеграла

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \varphi_0(x, u, t) dt, \quad (4)$$

де $\varphi(x, u, t)$ – задана безперервна функція власних аргументів.

Для визначеності будемо вважати, що ефективність керування тем вище, чем менше значення цього інтегралу. Тоді вираз (4) прийме вигляд

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \varphi_0(x, u, t) dt \rightarrow \min_{u \in U}, \quad (5)$$

де U - безліч допустимих управлінь.

Вираз (5) називається критерієм оптимальності.

в) На управління і змінні стани накладаються обмеження, що свідчать про обмежених ресурсах управління і припустимі межі зміни змінних стану.

Задачу оптимального управління можна сформулювати наступним чином:

$$\begin{aligned} |x(t)| &\leq x^*, \\ |u(t)| &\leq u^*, \end{aligned} \quad (6)$$

Необхідно знайти оптимальні управління при яких об'єкт (1) переводиться зі стану (2) в стан (3), виконуються обмеження (6) і при цьому функціонал (4) приймає найменше значення. Функцію називають оптимальним програмним управлінням.

1.2 Критерії оптимальності

Критерії оптимальності типу (5) називаються скалярними, якщо вони представляють тільки один приватний критерій із сукупності всіх критеріїв, що характеризують якість систем управління. Розрізняють три види критеріїв оптимальності:

- 1) критерій оптимальності по – швидкодії;
- 2) критерій оптимальності по – точності;
- 3) всі інші критерії.

В якості критерію оптимальності по – швидкодії може бути прийнятий час перехідного процесу:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} 1(t) dt = t_1 - t_0 = T. \quad (7)$$

Отримана при цьому система є оптимальною по-швидкодії, якщо забезпечується мінімум інтеграла (7) з урахуванням обмежень.

Як критерій оптимальності по точності може бути інтегральна оцінка якості перехідного процесу.

$$J = \int_{t_0}^z \Delta x^2(t) dt, \quad (8)$$

де Δx – відхилення фактичного стану x від заданого .

Отримана по мінімуму інтеграла (8) система є оптимальною за точністю в динамічних режимах при ненульових початкових умовах або одиничному заданому впливі.

В якості критерію оптимальності, що відноситься до третього виду, можна використовувати критерій, що характеризує витрата енергії на управління. Для електричного джерела енергії він буде мати вигляд

$$J = \int_{t_0}^{t_1} U(t)i(t) dt, \quad (9)$$

де $U(t)$ і $i(t)$ - напруга і струм навантаження джерела.

Отримана з умови мінімуму функціонала (9) система є оптимальною по витраті енергії на управління.

1.3 Обмеження координат

Обмеження (6) ділять на два типи:

1) обмеження 1-го роду (природні обмеження) обумовлені принципом роботи об'єкта. Наприклад, частота обертання асинхронного двигуна не може бути більше синхронної; вихідні сигнали підсилювачів обмежені через явища насичення;

2) обмеження 2-го роду (умовні обмеження), які вводять свідомо. Наприклад, величину струму якоря електродвигуна постійного струму обмежують умовами початкової комутації на колекторі, нагріванням струмоведучих частин, граничною температурою ізоляції обмоток. У ряді випадків обмеження задаються у вигляді функціоналів. Так, обмеження на нагрів двигуна постійного струму визначаються інтегралом

$$J_{\text{доп}} = \int_{t_0}^{t_1} R_{\pi} i_{\pi}^2(t) dt \leq W_{\text{доп}},$$

де R_{π} - опір обмотки якорю двигуна.

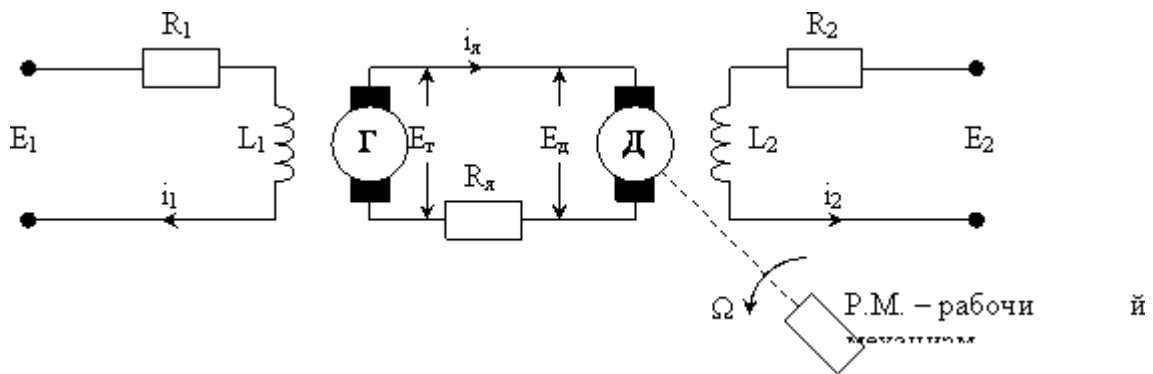
i_{π} - струм якорю,

$W_{\text{доп}}$ - припустима енергія, що витрачається на нагрів двигуна.

При оптимізації технологічних процесів приймають певні обмеження економічного характеру, що накладаються на продуктивність, якість і собівартість продукції, і т.д.

1.4 Завдання програмного керування

Як приклад завдання оптимального програмного керування розглянемо задачу керування силовою частиною електричного приводу типу "двигун-генератор". Тут E_1 , i_1 - напруга в обмотці збудження генератора Γ , E_2 , i_2 - напруга в обмотці збудження двигуна Δ



1) Рівняння моментів на валу двигуна

$$I \frac{d^2 \Omega}{dt^2} = M_{\text{де}} - M_{\text{нагр}} \quad (10)$$

I – момент інерції якорю двигуна і можливість рушати робочий механізм (P.M.),

Ω – кут обертання двигуна,

$M_{\pi} = k \cdot i_2 \cdot i_{\pi}$ - момент навантаження

2) Рівняння якорного кола

$$E_{\pi} - E_{\pi} = i_{\pi} R_{\pi} \quad (11)$$

$E_{\pi} = \Phi_{\pi}(i_1)$ - Е.Д.С. генератору,

$E_{\pi} = c i_2 \frac{d\Omega}{dt}$ - Е.Д.С. двигуна, c – коефіцієнт пропорційності.

Подставимо E_{Γ} и E_{Δ} в (2)

$$i_{\pi} = \frac{\Phi_{\Gamma}(i_1) - c i_2 \dot{\Omega}}{R_{\pi}} \quad (12)$$

3) Рівняння кіл збудження генератору і двигуна

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 &= E_1, \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 &= E_2, \end{aligned} \quad (13)$$

Можливі такі режими управління Р.М.

- а) за \min час розгону до заданої швидкості,
- б) зробити задану роботу за \min час,
- в) перемістити механізм з одного положення в інше за заданий час при \min втрати в ланцюгах управління і якорного ланцюга.

Таким чином оптимальні за швидкодією режими передбачають такі керуючі впливи на електропривод, при яких зміна станів руху електроприводу передбачає переходи по мінімальним траєкторіям за часом і довжини. А саме головне без коливань. Їе складна задача тому, що на привод крім внутрішніх процесів впливають інерційні властивості робочих механізмів (РМ).

РОЗДІЛ 2

ОПТИМАЛЬНІ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Більшість сучасних промислових машин, систем и установок представляють собою складні електромеханічні системи, що включають рухомі маси, пов'язані між собою механічними ланками або трансмісіями з пружними властивостями. Крім цього до складу системи входить електропривод з напівпровідниковими перетворювачами в силових цепях, система управління, засоби захисту, датчики контролю параметрів і т.п. У рішенні задачі оптимізації динамічних режимів роботи таких систем значне місце займає математичне опис та дослідження динамічних режимів, викликаних керуючими впливами і впливами що збурюють, заважають руху системі.

Ланки електроприводу і системи керування мають типову форму математичного опису фізичних та інформаційних процесів, що протікають в них. Їх прийнято називати перехідними процесами. При наявності елементів з розподіленими параметрами в механічній частині таких складних систем, як підйомні установки з протяжною трансмісією (тобто глибокі підйомні, бурові установки та ін.) Дослідження таких системи представляють великі труднощі.

2.1. Математичне моделювання технічних систем за класичними законами механіки

Науково-дослідні роботи на етапі проектування сучасних технічних систем, зокрема контролю і керування передбачає всебічне дослідження ресурсів системи при змінах зовнішніх впливів і внутрішніх параметрів. Наприклад, досліджуються вихідні параметри системи як функції змін вхідних керуючих впливів, зовнішніх факторів, включаючи нестабільність навантажень, живлення, температурних та ін. режимів, а також зміни параметрів елементів системі. В сучасних умовах при наявності математичної моделі системи усі ці вимоги можуть бути здійснені швидко, без додаткових затрат за допомогою комп'ютерного моделювання.

Фізичні і інформаційні процеси в технічних системах описуються класичними законами відповідних фундаментальних наук.

На їх основі проводиться математичний опис руху елементів або процесів в системі. Опис системи може бути виконаний в аналітичній, графічній формі або комбінованій. Графічна форма опису наочно показує усі істотні зв'язки елементів в системі і їх взаємодію.

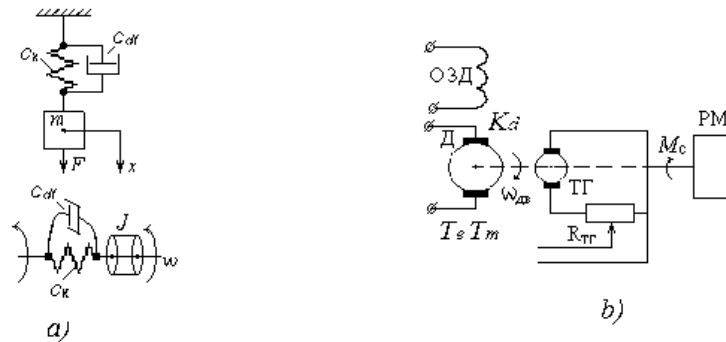


Рис. 2.1 – Типові схеми елементів систем з аналоговими властивостями: механічні (a) і електромеханічні (b).

Приклади принципів схем типових механічних, електромеханічних і електричних систем, представлені на рис.2.1

Для отримання заданої якості керування складними технічними системами використовують стандартні способи і засоби корекції. Зокрема, застосовуються уніфіковані пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори які виконані на основі мікроелектронних аналогових пристроїв і здатні ефективно корегувати і оптимізувати природні амплітудно-частотні характеристики системи. Але в деяких випадках виникають складності при вирішенні проблем оптимізації керування складними системами в екстремальних умовах експлуатації. Наприклад, забезпечення високої швидкодії, зменшенні динамічних перевантажень і безпеки систем з протяжною трансмісією при аварійних режимах роботи, оптимального керування високоточними астатичними системами позиціонування.

Комп'ютерне моделювання ефективний інструмент для синтезу способів оптимального керування складними процесами і системами за заданими критеріями оптимальності. Зокрема за швидкодією, мінімальними динамічними перевантаженнями, енергоефективністю.

Відомо що процес керування вважається оптимальним по динамічним властивостям, якщо при ступінчастому впливі забезпечується монотонний перехідний процес в заданий стан при мінімальному часі [3, 4, 11]. Тому для створення оптимального перехідного процесу в системи необхідно забезпечити почергову зміну динамічних координат руху в часі до досягнення обмежень. Наприклад, зміну координат: переміщення, швидкості, прискорення, ривку тощо.

Під оптимальним динамічним режимом систем з пружними властивостями розуміють відсутність внутрішніх механічних коливань в перехідних процесах [3, 4]. Така система може бути названа оптимальної по динамічності або по динамічним навантаженням. У системах із багатьма рухомими масами і декількома ступенями свободи оптимізацію здійснюють по основній (низької) частоті. Розглянемо питання синтезу керуючого впливу, що оптимізує процес, на прикладі двох масової пружної системи. При цьому будемо вважати, що електропривод дозволяє плавно змінювати швидкість обертання в широкому діапазоні, а коефіцієнт пружності $c_1 = c_2 = c$. Передаточна функція по відношенню до динамічного зусилля F_1

$$W(p) = \frac{F_1(p)}{F_{\text{дв}}(p)} = \frac{c}{m_1(p^2 + \omega^2)}, \text{ де } \omega = \sqrt{\frac{2c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \quad (2.1)$$

Якщо $F_{\text{дв}}$ в період пуску збільшується за лінійним законом, наприклад, $F_{\text{дв}} = \varepsilon t$, то двох масова система згідно перетворенню Лапласа-Карсона:

$$F_1(p) = \frac{\varepsilon}{m_1 p(p^2 + \omega^2)} = \frac{\varepsilon}{m_1 \omega^2} \left(\frac{1}{p} - \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right). \quad (2.2)$$

Отже,
$$F_1(t) = \frac{\varepsilon}{m_1 \omega^2} t - \frac{\varepsilon}{m_1 \omega^3} \sin \omega t. \quad (1.3)$$

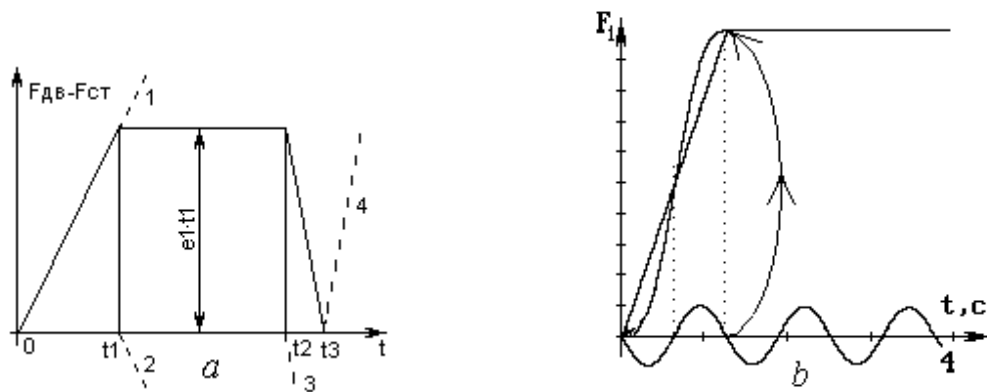


Рис. 2.2 – Трапецеїдальна діаграма впливу на пружну систему (а). Діаграма перехідного процесу в пружній системі при лінійному впливі протягом періоду її власних коливань (b)

Проаналізувавши (2.3) можна зробити висновок, що складовими перехідного процесу є пряма лінія і синусоїда. Звичайно в реальних системах $F_{\partial\epsilon}$ збільшується до визначеного значення, а у кінці періоду прискореного руху стає рівним силі статичних опорів.

Така кусково-лінійна характеристика може бути описана системою звичайних лінійних рівнянь, яким відповідають графіки 1, 2, 3, 4.

$$F_{\partial\epsilon} - F_{cm} = \begin{cases} \epsilon_1 t & \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \\ \epsilon_1 t - \epsilon_1(t - t_1) = \epsilon_1 t_1 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \\ \epsilon_1 t_1 - \epsilon_2(t - t_2) & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \\ \epsilon_1 t - \epsilon_2(t - t_2) + \epsilon_2(t - t_3) = 0 & \text{при } t \geq t_3 \end{cases} \quad (2.4)$$

При $F_{cm} = 0$ рівняння (1) відповідає графікам 1 і 2 запишеться так:

$$F_{11}(t) = \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^2} t - \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^3} \sin \omega t; \quad (1.5)$$

$$F_{12}(t) = \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^2} (t - t_1) - \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^3} \sin \omega(t - t_1) \quad (1.6)$$

Якщо прийняти $t_1 = 2\pi / \omega$, то $F_{12}^*(t) = \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^2} (t - t_1) - \frac{\epsilon_1 c}{m_1 \omega^3} \sin \omega t$

Отже на ділянці $t_1 \leq t \leq t_2$ динамічна складова зусилля F_1 буде змінюватися за законом $F_1(t) = F_{11} - F_{12}^* = \frac{\varepsilon_1 c t_1}{m_1 \omega^2} = \frac{2\pi c \varepsilon_1}{m_1 \omega^3}$, при t_1 рівному періоду власних коливань пружної системи коливального процесу не буде і система буде оптимальною по динамічності. Графік зміни F_1 представлений на рис. 2.2 *b*.

До таких об'єктів керування відносяться електромеханічні системи з пружними зв'язками. Вони характеризуються складаними перехідними процесами і тому вимагають раціональних способів керування. Зокрема, за лінійним законом впливу на систему протягом часу, кратному періоду власних коливань системи, або інший варіант способу – двоступінчастій вплив із затримкою часу застосування другого ступеня на половину періоду власних коливань системи. Такі способи застосовуються в звичайних робочих режимах. При цьому необхідно враховувати деякі особливості способу, пов'язані з точністю визначення параметру періоду власних коливань системи. Для цього проведемо додаткові комп'ютерні моделювання обох варіантів в разі відхилень розрахункових параметрів керуючого впливу на пружну систему від реальних на $\pm 50\%$. Результати представлені на рис. 5 *a, b*. Очевидно, що такий спосіб не дивлячись на простоту вимагає точного визначення параметру реального періоду коливань системи в момент впливу. Тому для вирішення проблем динаміки в складних умовах, наприклад, критичних за часом, необхідно користуватись більш адекватною з точки зору динамічності, моделлю системи. Попередній базовий закон, був другий закон Ньютона для статичних, або близьких до них режимів роботи системи.

2.2. Моделювання складних систем методом багатокординатного керування.

Для створення адекватної математичної моделі динамічних властивостей системи використовують відповідні фізичні закони. Розглянемо, наприклад, моделювання динамічних властивостей механічної системи з пружними зв'язками. В якості вхідного сигналу приймемо зусилля F , що діє на масу m , а вихідною змінною приймемо

відповідне переміщення маси, x . До інших параметрів системи відносяться коефіцієнт жорсткості C_k пружної частини і коефіцієнт, що враховує сили тертя C_{df} . Згідно другому закону Ньютона рівняння руху механічної системи:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(t) - C_{df} \frac{dx}{dt} - C_k x \quad (2.5)$$

Для зручності переходу до аналогового моделювання впорядкуємо и розділимо вихідну і вхідну частини диференційного рівняння.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C_{df} \frac{dx}{dt} + C_k x = F(t) \quad (1.6)$$

Застосуємо перетворення Лапласа-Карсона, перейдемо від функції реального часу t до функції комплексної змінної $p \rightarrow \frac{d}{dt}$, що в операторній формі символізує операцію диференціювання.

$$[mp^2 + C_{df}p + C_k]X(p) = F(p) \quad (2.7)$$

Отримане рівняння представимо у вигляді передаточної функції системи, що є співвідношенням операторних зображень виходу до входу і представимо його в стандартному і зручному для інтегрування вигляді

$$W(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{k^{-1}}{mk^{-1}p^2 + ck^{-1}p + 1} = \frac{k^{-1}}{T_1T_2p^2 + T_2p + 1} = \frac{\frac{K}{T_1T_2}p^{-2}}{1 + \frac{1}{T_1}p^{-1} + \frac{1}{T_1T_2}p^{-2}}$$

де $T_1T_2 = mk^{-1}$, $T_2 = ck^{-1}$, $T_1 = mc^{-1}$, $K = k^{-1}$

$$X(p) = F(p) \frac{\frac{K}{T_1T_2}p^{-2}}{1 + \frac{1}{T_1}p^{-1} + \frac{1}{T_1T_2}p^{-2}} \quad (2.8)$$

Отримане співвідношення можна представити у вигляді алгоритму для комп'ютерного моделювання. При цьому для зручності використання методу змінних станів отримане співвідношення (2.8) необхідно представити у вигляді структурної

схеми, на підставі якої визначимо значення внутрішніх змінних для цифрового (комп'ютерного) моделювання. Як зазначено вище при цифровому методі обчислень процеси розгортаються послідовно в часі. Це важливо при виконанні деяких обчислень, пов'язаних з необхідністю зберігання результатів проміжних обчислень. В даному випадку виконання процесів інтегрувань за будь яким методом передбачає такі умови. Тому прийmemo шаг квантування T , значення якого визначається з компромісу між необхідною точністю і часу обчислень. В якості методу інтегрувань прийmemo метод трапецій. Тоді алгоритм моделювання буде складатися з системи рівнянь:

$$\begin{cases} E = F - x1/T1 - x2/(T1T2), \\ X = x2 \cdot k/(T1T2), \\ x1n = x1n-1 + 0.5 \cdot (En + En-1) \cdot T, \\ x2n = x2n-1 + 0.5 \cdot (x1n + x1n-1) \cdot T \end{cases}$$

На підставі отриманого алгоритму складається програма моделювання динамічних властивостей механічної системи з пружними властивостями. Результати моделювання отримані у графічному форматі і представлені на рис. 2.3.

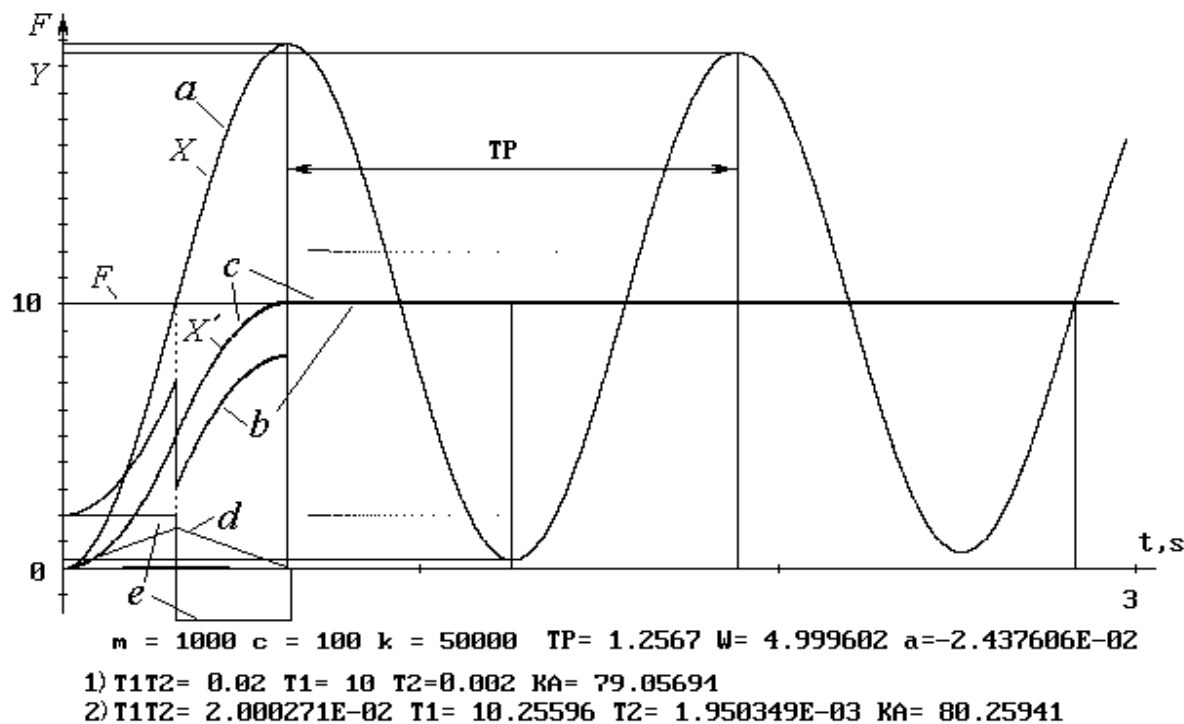


Рис. 2.3 – Часові діаграми моделювання динамічних властивостей механічної системи з пружними властивостями (a) без застосування і (b) з застосуванням способу оптимального керування за динамічними властивостями діаграм: c – функція впливу по

основній координаті, d – по першій похідній, e – по другій похідній, $b=c+d+e$ – функція сумарного впливу на систему.

Програма може бути використана також при синтезі оптимального за динамічними властивостями керування на основі методів технічної кібернетики.

Описаний спосіб застосовує більш адекватний вплив через електропривод на складну систему і вирішує задачу швидкодії і вільний від недоліків технічних рішень що описані вище, що показано на рис. 2.4.

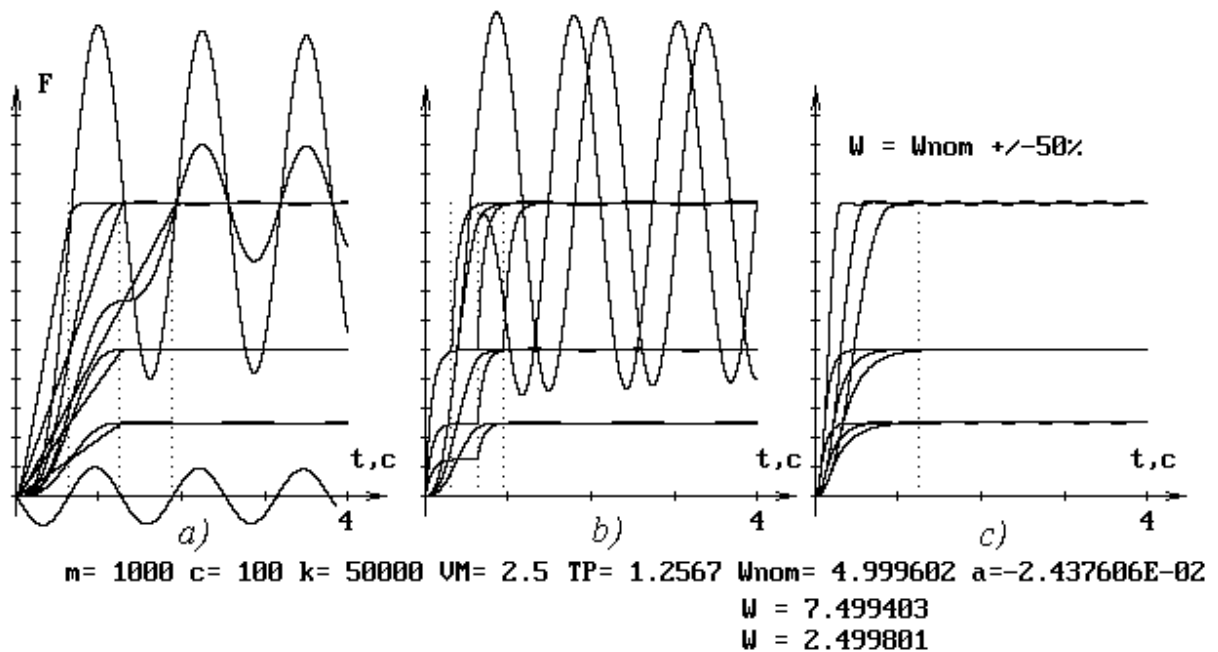


Рис. 2.4 – Порівняльні характеристики динаміки пружної системи при різних способах впливу на пружну систему і при відхиленні розрахункових частотних параметрів на $\pm 50\%$: а) лінійний вплив керуючого сигналу за час, відповідний періоду власних коливань; б) двох ступеневий вплив з затримкою другого ступеня на півперіоду; в) багатокординатний вплив по основній координаті руху і двом її похідним приведеним до основної координати

Позначені параметри: m – приведена до двигуна маса частин що рухаються, c – коефіцієнт опору і k – жорсткість пружної частині. TP – період, ω – кругова частота, α – коефіцієнт демпфірування.

Сутність способу полягає в найбільш досконалому застосуванні другого закону Ньютона в умовах динамічних процесів шляхом одночасного впливу на об'єкт по кільком

динамічним координатам: основної координаті руху і її першої та другої похідним, приведеним до основної координаті. При цьому координати функціонально пов'язані між собою природною диференційною залежністю, обмежені по амплітуді природними властивостями і узгоджені з енергетичними ресурсами приводу, що діє на об'єкт керування. Результати комп'ютерного моделювання способу представлені на рис.3 (діаграми *b, c, d, e*) і порівняння на рис. 5 с. Зазначені технічні рішення сприяють оптимальному по динамічним властивостям перехідному процесу. Результати наочно демонструють перевагу багатокординатного керування складними системами, особливо в критичних ситуаціях пов'язаних з обмеженнями в часі. Оптимально визначений багатокординатний вплив на динамічні координати складної системи по якості керування подібний визначенню позиції об'єкта в ортогональній системі координат.

При дослідженні складних систем виникає проблема апроксимації деяких розрахунків, пов'язаних з вирішенням диференціальних рівнянь у яких в процесі руху змінюються первинні параметри коефіцієнтів, що визначаються рухомими елементами і довжиною трансмісії. При зміні довжини пружного зв'язку на рис.2.1а змінюються параметри мас (включаючи трансмісію), коефіцієнти жорсткості і тертя за законами, які складно враховувати при моделюванні. Але для вирішення проблеми можна використати математичні методи апроксимації функцій шляхом переходу від первинних параметрів до вторинних. Для пояснення такого кроку розглянемо поняття дуалізму, що використовується у квантової фізики.

Поняття дуалізму в фундаментальних науках використовується для побудови адекватних моделей (описів) властивостей об'єктів, явищ, процесів що досліджуються. Зокрема, в основі квантової фізики лежить запропонована Луї де Бройлем гіпотеза корпускулярно-хвильового дуалізму відносно властивості будь-якої мікрочастинки виявляти ознаки частки (корпускули) і хвилі. Найбільш яскраво корпускулярно-хвильовий дуалізм проявляється у елементарних частинок. Електрон, нейтрон, фотон в одних умовах поведуться як добре локалізовані в просторі матеріальні об'єкти (частки),

що рухаються з певними енергіями і імпульсами за класичними траєкторіях, а в інших – як хвилі, що проявляється в їх здатності до інтерференції і дифракції.

Звичайно, фізику макрорівня не можливо порівнювати з фізикою елементарних частинок, але деякі паралелі тут можна знайти. Особливо коли настає необхідність пошуку спрощення розрахунків складних процесів. Дуалізм на макрорівні дає можливість описати процес використовуючи його різні властивості, наприклад, фізичні або математичні. Така апроксимація в даному випадку може бути здійснена шляхом заміни первинних динамічних параметрів процесу (маси, коефіцієнти жорсткості, тертя та ін.) вторинними, фізична природа яких описується по іншому. При цьому необхідно забезпечити максимальну адекватність отриманої моделі первинної. Такий спосіб доцільно застосовувати для більшості складних технічних систем з багатьма ступенями свободи, інерційними елементами і реактивними властивостями системи в перехідних режимах. Зазвичай такі системи мають частотні спектри де на процес суттєво впливає перша гармоніка (основний тон коливань). Решта частина гармонік вище основної швидко демпфіруються і тому їх впливом можна знехтувати. Тому аналізуючи отриману модель перехідного процесу на рис.3 а можна прийти до висновку, що для вирішення практичних завдань отримана крива може бути апроксимована, наприклад, рівнянням другого порядку для опису гармонічно згасаючих коливань основної частоти:

$$Y_{appr}(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot \exp(-\alpha t) + y_0 \quad (2.9),$$

де $\omega = 2\pi / TP$ [с⁻¹] – кругова частота коливань де TP [с] – період коливань;
 $\alpha = \left| \lg(1 - A_1 / y_0) \right| / TP$ [с⁻¹] – коефіцієнт демпфірування, де A_1 / y_0 – співвідношення від'ємної амплітуди другого періоду коливань до сталого значення.

Співвідношення для розрахунків коефіцієнтів моделювання механічної системи за звичайними і частотними параметрами:

$$T1T2 = m/k \approx 0.5(\omega^2 + \alpha^2)^{-1}, \quad T2 = c/k \approx 2\alpha(\omega^2 + \alpha^2)^{-1}, \quad T1 = m/c \approx 0.25 \alpha^{-1}.$$

У загальному випадку, застосувавши перетворення Лапласа-Карсона, математичний опис може бути записано в частотних параметрах:

$$\frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{e_m p^m + e_{m-1} p^{m-1} + \dots + e_1 p + e_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \approx \frac{\omega \cdot A \cdot \cos \varphi}{(p + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(p + \alpha) \cdot A \cdot \sin \varphi}{(p + \alpha)^2 + \omega^2} \quad (2.10)$$

Описаний спосіб апроксимації досліджений на комп'ютерних моделях і показав достатньо добру адекватність і точність моделювання. На рисунку 3 представлені результати моделювань і порівняння коефіцієнтів моделювання, що розраховані на підставі первинних (1 – динамічних) і вторинних (2 – частотних) параметрів. В даному випадку обидві криві співпадають тому, що мають один порядок.

Прийнятий спосіб апроксимації спрощує розрахунки і адекватно моделює динамічні процеси в складних системах. Застосування частотних параметрів в якості аргументу дає можливість реалізувати синтез оптимального по динамічності керування складними системами. Зокрема, дані технічні рішення захищені патентами на винаходи в способи оптимального керування складними електромеханічними системами гальмування шахтних підймальних машин і способі оптимального керування астатичними системами [6, 11,12,13].

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

3.1 Дослідження моделі підйому з розподіленими параметрами

Синтез системи оптимального управління здійснюється на основі математичного опису динамічних властивостей об'єкта. Для систем аварійного гальмування в умовах глибоких шахт велике значення має вплив пружної частини системи підйому (підвісні і врівноважують канати) і її взаємодія з рухомими масами (провідний шків тертя з редуктором і двигуном, підйомні посудини і маси канатів).

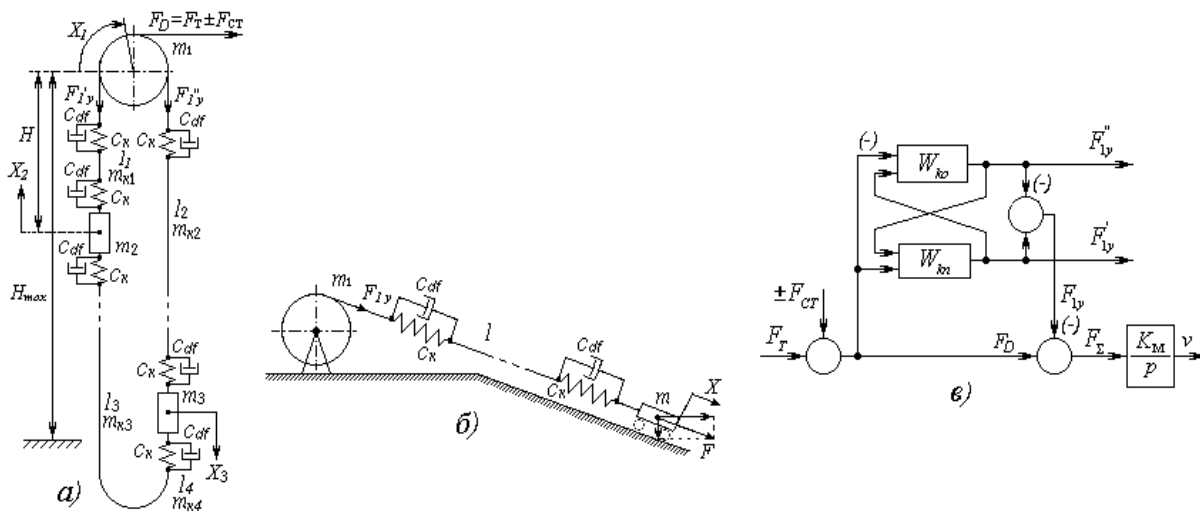


Рис. 3.1 – Розрахункові схеми шахтних підйомів: вертикального врівноваженого (а), похилого (б) і математична модель – структурна схема пружної частини підйому (в)

Розрахункові схеми вертикального врівноваженого зі шківом тертя і похилого барабанного підйому представлені на рис. 3.1 а, б

Вихідними параметрами в неї є зусилля в точках сполучення канатів із шківом тертя підйомальної машини або ліфта, F'_{1y} і F''_{1y} , а вхідними зусилля, $F_D = F_T \pm F_{CT}$ – приведена до вісі обертання вихідного валу маса всіх рухомих частин установки; H , H_{\max} – поточна і максимальна глибина підйому; F_D , F_T , F_{CT} , F'_{1y} , F''_{1y} – відповідно, зусилля: динамічне, гальмівне, статичне, пружне в точках сполучення канатів із шківом тертя (барабаном); c_{ki} , c_{df} – відповідно, коефіцієнти жорсткості і демпфірування гілок канатів, X_i – переміщення точок зосереджених мас, l_i – довжини гілок канатів.

Відповідна розрахункова структурна схема підйому, виконана за методикою [1], приведена на рис. 3.1в. Передавальні функції пружної частини системи підйому для загального випадку на рис. 1а:

$$W_{kn}(p) = \frac{\alpha_{11}(b'_0 p^4 + b'_1 p^3 + b'_2 p^2 + b'_3 p + b'_4)}{a'_0 p^4 + a'_1 p^3 + a'_2 p^2 + a'_3 p + a'_4},$$

$$W_{ko}(p) = \frac{\alpha_{21}(b''_0 p^4 + b''_1 p^3 + b''_2 p^2 + b''_3 p + b''_4)}{a''_0 p^4 + a''_1 p^3 + a''_2 p^2 + a''_3 p + a''_4},$$

де: $\alpha_{i1} = \frac{m_{ki}}{m_1}$ – коефіцієнти співвідношень рухомих мас, a'_i , a''_i , b'_i , b''_i – коефіцієнти диференціальних рівнянь; K_M – коефіцієнт, що враховує інерційні властивості підйомальної машини; v – лінійна швидкість.

З урахуванням типу установки і пружних властивостей головних і підвісних (врівноважувальних) канатів, що представлені структурною схемою на рис. 3.1в диференціальні рівняння відносно зусиль $F'_{1y}(p)$, $F''_{1y}(p)$ мають восьмий порядок для врівноваженого і четвертий – для одно кінцевого підйому. Для якісного керування об'єктом аналізуються його динамічні параметри і враховуються при синтезі системи керування. Зокрема, для систем підйому із шківом тертя в аварійних режимах найбільший практичний інтерес представляє випадок розташування підйомних судин в в крайніх положеннях, коли при перерозподілі механічної енергії між рухомими масами і пружною частиною амплітуди зусиль на основній частоті можуть досягати значень, спроможних приводити до прослизання канатів по шківу тертя. В цьому випадку можна

знехтувати пружністю коротких гілок, оскільки їх коефіцієнти жорсткості і демпфірування, відповідно: $c_{k1} \rightarrow \infty$, $c_{k4} \rightarrow \infty$, $c_{df} \rightarrow \infty$, а маси гілок підвісного канату m_{ki} додати у відповідні маси вантажів m_2 , m_3 . Це дасть можливість без істотних змін параметрів системи апроксимувати динамічні характеристики об'єкту керування зменшенням порядку диференційного рівняння системи.

Моделювання динаміки такої системи показало відсутність істотних змін параметрів на основній частоті, а виникають в початковий момент амплітуди високочастотних коливань в коротких гілках, швидко згасають і не вносять істотного впливу на динаміку процесу.

3.2 Синтез пристрою, що задає режим руху

Як зазначено вище динамічні властивості врівноваженого підйому можуть бути описані системою диференціальних рівнянь не нижче восьмого порядку. Також, будь-який загасаючий коливальний процес високого порядку може бути апроксимувати і описаний рівнянням:

$$y(t) = Ae^{-at} \sin(\omega t + \psi) + y_{ycm},$$

де A, ω – амплітуда і частота коливань основного тону; a – коефіцієнт демпфірування; ψ – фазовий зсув; y_{ycm} – усталене значення.

Для приведеної на рис. 1в структурної схеми передавальна функція апроксимованої системи підйому:

$$F_{\Sigma}(p) = [F_T(p) \pm F_{CT}(p)] [y_{ycm} + \frac{\omega A \cos \psi}{(p+a)^2 + \omega^2} + \frac{(p+a) A \sin \psi}{(p+a)^2 + \omega^2}] = F_D(p) \frac{e_2 p^2 + e_1 p + e_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

$$\text{де } e_2 = \frac{y_{ycm} + A \sin \psi}{\omega^2 + a^2}; \quad e_1 = \frac{2a y_{ycm} + A(a \sin \psi + \omega \cos \psi)}{\omega^2 + a^2}; \quad e_0 = y_{ycm}; \quad a_2 = \frac{1}{\omega^2 + a^2};$$

$$a_1 = \frac{2a}{\omega^2 + a^2}; \quad a_0 = 1.$$

Структурна схема моделі апроксимованої системи підйому із пристроєм що задає режим руху ЗУ, на основі нелінійного фільтру другого порядку представлена на рис. 3.2. В пристрої що задає режими руху реалізований принцип багатоканального керування з

обмеженням змінних [2], а початкові дані для нього є параметрами передавальної функції апроксимованої системи. ЗУ формує складний керуючий вплив, що представляє сукупність сигналів змінних $\alpha_1 U_1$, $\alpha_2 U_2$, $\alpha_3 U_3$, пропорційних складовим функцій швидкості, прискорення, ривку і обмежених значеннями, що формує блок завдання обмежень (БЗО).

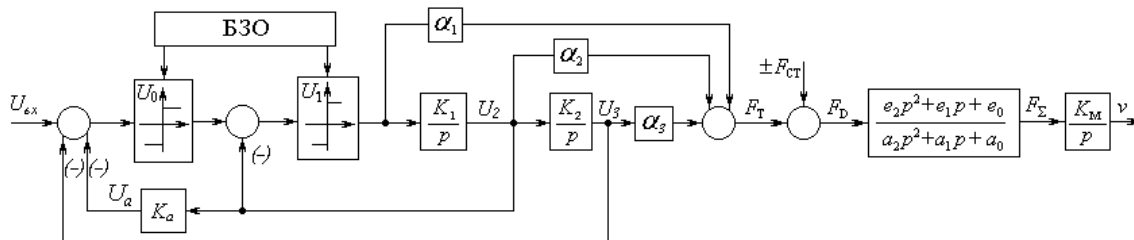


Рис. 3.2 – Структурна схема системи с моделлю пристрою що задає, ЗУ

Якщо в перехідних режимах усі змінні послідовно досягають обмежень, то найбільш оптимальним за швидкодією і динамічним режимам процес буде при коефіцієнті передачі внутрішнього зворотного зв'язку: $K_a = K_2 U_{2m} / (2K_1 U_{1m})$. При входніх впливах $U_{bx} < 2K_a U_{2m}$ сигнал U_2 не буде досягати величини U_{2m} і при постійному коефіцієнті K_a якість перехідних процесів не забезпечить необхідну швидкодію.

Для того, щоб при будь яких значеннях U_{bx} вихідна змінна змінювалася за оптимальним законам, коло зворотного зв'язку повинно реалізовувати залежність

$$U_a = K_a U_2 = K_a U_2^2 \text{sign} U_2.$$

Коефіцієнти K_1 і K_2 пристрою обираються із умов заданих значень обмежених першою і другою похідних змінної об'єкту керування. Якщо $a_m = dv/dt$ и $\rho_m = d^2v/dt^2$ відповідають максимально допустимим значенням прискорення і ривку, то прийняв $U_3 = K_c \cdot v$, отримаємо розрахункові співвідношення:

$$a_m = K_2 U_{2m} / K_c; \rho_m = K_1 K_2 U_{1m} / K_c \text{ або}$$

$$K_1 = \rho_m U_{2m} / (a_m U_{1m}); K_2 = a_m K_c / U_{2m};$$

$$K_c = U_{bx} / v_m; K_1 = \rho_m / a_m; K_2 = a_m / v_m.$$

У відповідності з прийнятими значеннями K_1 і K_2 дія U_{bx} може мати будь яку форму, а вихідні сигнали U_1 , U_2 , U_3 будуть змінюватись за заданим законом. Для значень сигналів U_1 і U_2 , пропорційних відповідно другої і першої похідним основного керуючого сигналу U_3 , в якості компенсаційного впливу коефіцієнти α_i обираються з співвідношень, враховуючих параметри об'єкту керування. Для апроксимованої системи, представленої на рис. 1а і 2 коефіцієнти ЗУ:

$$\alpha_1 = K_1 K_2 a_2 / a_0, \alpha_2 = K_2 a_1 / a_0, \alpha_3 = 1.$$

На підставі приведених співвідношень розроблена цифрова модель системи підйому для режиму запобіжного гальмування, яка реалізована в комп'ютерній програмі. Результат моделювання динамічних процесів в пружній частині підйому з застосуванням в системі керування задаючої моделі пристрою представлені на рис. 3.

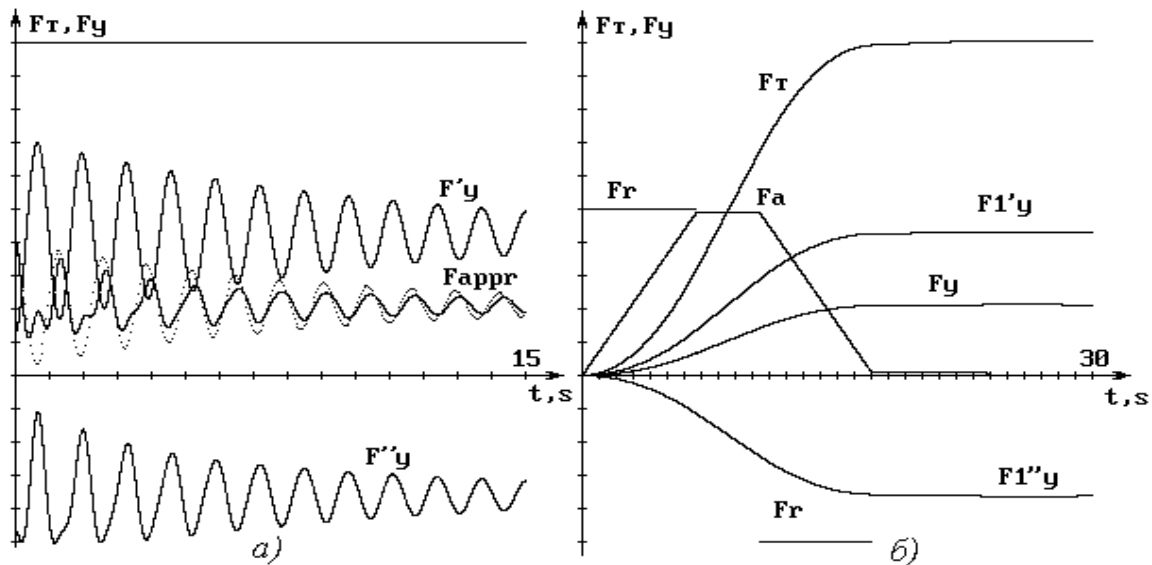


Рис. 3.3 – Моделювання динамічних характеристик пружної частини підйомальної установки: а) перехідні характеристики зусиль $F_{1y}(t)$, і її апроксимація $F_{appr}(t)$; б) динамічні характеристики пружної частини за законами гальмування з обмеженням уповільнення і ривку.

В результаті аналізу осцилограм, отриманих при дослідженнях і промислових випробуваннях систем АРЗГ ШПУ, уточнені математичні описи і цифрові моделі динамічних властивостей систем. Установлено, що частота основних коливань в пружної

частині врівноваженого підйому визначається в основному глибиною знаходження підйомальних судин, а зміни мас що рухаються судин впливають значно менше. Таким чином, визначить параметри настройки ЗУ, можливо шляхом сканування зусиль в канатах при номінальному навантаженні на відповідних ланках підйому або безперервно за допомогою функціонального перетворювача, що контролює переміщення судин в стовбурі.

Для уточнення оптимальних законів і алгоритмів роботи замкнутих систем АРПТ ШПУ проведено моделювання їх динамічних режимів з урахуванням впливу пружної частини підйому. Встановлено, що в результаті дій пружних сил в точках сполучення канатів зі шківом тертя гальмування підйомної машини з постійним уповільненням при зупинці призводить до значних динамічних перевантажень. Виникнення перевантажень пояснюється стрибкоподібним зміною уповільнення і без обмеження ривка. У врівноважених системах підйому це може призводити до некерованого прослизання канатів по зафіксованому гальмом шківа. Запобігти виникненню таких ситуацій можна раціональним управлінням гальмом перед зупинкою після досягнення безпечної швидкості шляхом зниження гальмівного зусилля.

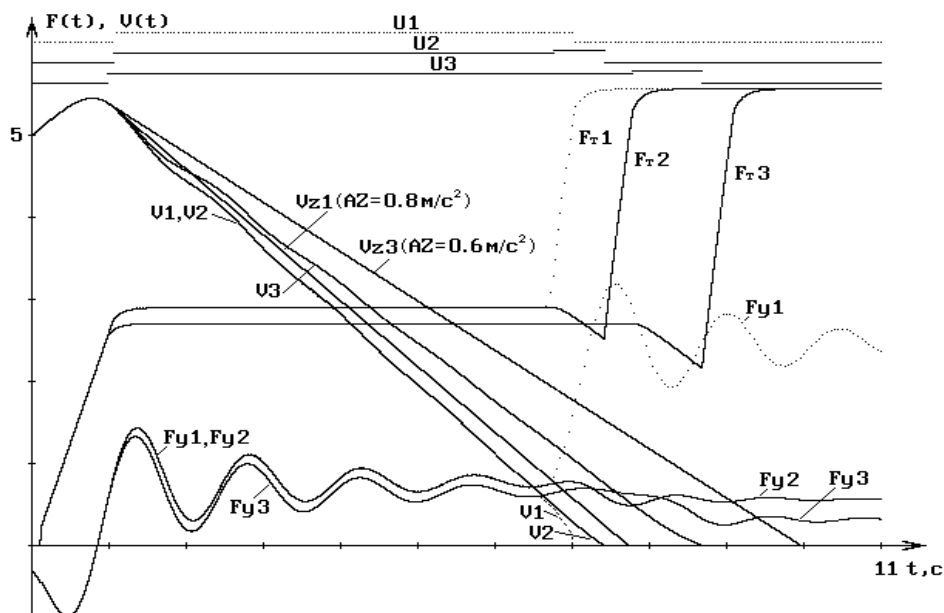


Рис. 3.4 – Моделювання динаміки гальмування похиленого підйому замкнутою системою АРЗГ в режимі спуску вантажу з різними заданими уповільненнями і режимами керування гальмом на мінімальній швидкості

На рис. 3.4 представлені результати комп'ютерного моделювання запобіжного гальмування похилого підйому в режимі спуску вантажу з постійним заданим уповільненням і з лінійно зниженим перед зупинкою.

Позначені: 1 - при постійному уповільненні $0,8 \text{ м/с}^2$, 2 - при лінійному зменшенні того ж уповільнення перед зупинкою, 3 - при лінійному зменшенні уповільнення $0,6 \text{ м/с}^2$ перед зупинкою; швидкості підйому: V_1 (2,3) - дійсна, V_{z1} (2,3) - задана; зусилля: F_T , F_{T1} (2,3) - гальмівне; F_y , F_{y1} (2,3) - пружне, в точках сполучення каната зі шківом тертя (барабаном), U_{1-3} - сигнали управління приводом гальма, T - період власних коливань пружної частини підйому на основній частоті.

ВИСНОВКИ

В роботі проведені дослідження оптимізації керування систем за швидкодією. Представлені результати оцінки ефективності різних способів досягнення поставлених завдань.

На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень, уточнені математичні описи динамічних режимів ШПУ для синтезу технічних засобів і оптимізації управління підйомом.

Наведені результати комп'ютерного моделювання оптимізованих систем. Визначені резерви подальшого удосконалення систем оптимального керування.

Найбільш перспективні результати умовах дефіциту часу показав спосіб багатокординатного керування.

Методика синтезу може бути використана при створенні систем управління об'єктами зі складною динамічною структурою і параметрами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://any-book.org/download/26845.html> - поняття оптимальності
2. Васильев В.И. Компьютерное исследование динамики остановки ШПУ при предохранительном торможении//В.И. Васильев//Вісник Сум ДУ. Серія Технічні науки, 2011, №1 – С. 84-88.
3. Чермалых В.М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
4. Васильев, В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами // Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – <http://asac.kpi.ua/article/view/29085> , дата доступу: 19.05.2021 р.
5. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Автоматизированный электропривод подъемных установок глубоких шахт.. М., Недра, 1983, 270 с. 23
6. Васильев В.И. Оптимальное управление сложными динамическими системами / В.И. Васильев, Е.В. Васильев // East European Scientific Journal #5(45), 2019, p.32-44. Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland (Східноєвропейський науковий журнал #5(45), 2019, С.32-44) — https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_may1.pdf , дата доступу: 22.05.2021 р.
7. Vasyliiev, V.I. The method for optimal control of high precision quick scanning system. / V.I. Vasyliiev, E.V. Vasyliiev // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2019: Міжнародн.. н-техн. конф. (Київ, 18–24 листопада 2019 р.). - Київ: 2019. - С. 147-149.

http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS_2019_s5_t04.pdf дата доступу: 22.05.2021 р.

8. 10 Самых глубоких шахт мира. <https://toprating.in.ua/10-samyh-glubokih-shaht/>
9. Правила безпеки у вугільних шахтах. – Інформ.-аналітичн. центр «ЛІГА», 2010. – 187 с.
10. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. – М. : Недра, 1976. – 303 с. 2
11. Спосіб гальмування шахтної підйимальної установки. Патент України на винахід UA114179 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.: ДП “УІІВ” (Укрпатент), опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.
12. А.с. № 1296500 (СССР) Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Чермалых В. М., Васильев В. И., Матвиенко Н. П. // Открытия. Изобретения. - 1987. Бюл. № 10. **86**
13. А.с. № 1447743 СССР, МКИ В 66 В 5/00 / Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Васильев В.И., Дубовик В.Г., Чермалых В.М. // Открытия. Изобретения. - 1988. Бюл. № 48. 59
14. Степанов А.Г. Аварийное торможение подъемных установок сверхглубоких шахт. Горное оборудование и электромеханика №7, 2014 г., с. 33-41.
15. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.
16. А.с. № 1715705 СССР, МКИ В 66 В 1/32/Способ дискретного управления тормозом шахтной подъемной машины/Васильев В.И., Чермалых В.М., Матвиенко Н.П. // Открытия. Изобретения. - 1992. Бюл. № 8. 63

17. А.с. № 1703598 СССР, МКИ В 66 В 1/32 / Устройство для управления тормозом шахтной подъемной машины / Кашич А. М., Васильев В. И. // Открытия. Изобретения. - 1992. Бюл. № 1.
18. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Бен Куо // – М.: Машиностроение, 1986, – 448 с.
19. Чермалых В.М. Многоканальные системы оптимального управления электроприводом промышленных установок / В. М.Чермалых // – Изв. Вузов “Горный журнал”, 1982, №7. – С. 123-129. 58
20. Блэкборн Дж. Ф. Гидравлические и пневматические системы управления. / Дж. Ф. Блэкборн, Г. Ритхоф, Дж. Л. Шерер //– М.: ИИЛ, 1962. – 612 с. 60
21. Подлесный Н. И., Рубанов В. Г. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов //– К.: Вища школа., 1982. – 472 с.
22. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В.Солодовников, В.Н.Плотников, А.В.Яковлев. // – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
23. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М., Наука, Гл. ред. ф.-м. литер. / 1975. –768 с.
24. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. // – 12th ed. – 2011. – 1082 p.
25. Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. МАИСК. – Одесса: “Астропринт”, 2010, №8. – С. 18-29.

27. Спосіб оптимального керування астатичними системами. Патент України на винахід UA117229 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.:ДП “УІВ” (Укрпатент), опубл. 10.07.2018, бюл. № 13.

26. Васильєв, В.І. Дослідження способів оптимального керування динамічними системами. / В.І. Васильєв, Є.В. Васильєв // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2014: Матеріали Міжнародн. н-техн. конф. (Київ, 11–16 березня 2014 р.). - Київ: 2014. - С. 51-53.

http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/260/RTPSAS_2014_s2_t2.pdf , дата доступу: 19.05.2021 р.