

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

20\_\_ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171 Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: **Розробка системи запобігання динамічних перевантажень для керування складною системою**

Здобувача групи ЕІЗ-91к Колесника Володимира Сергійовича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст. викладач, к.т.н.

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

В.І. Васильєв /

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант<sup>1)</sup>

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Конотоп – 2023

Примітки:

1) Зазначається за наявності

## АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є аналіз проблем пов'язаних з керуванням складної за динамічними властивостями електромеханічної системи, на прикладі шахтного підйому з метою оптимізації керування ним в критичних за часом ситуаціях з точки зору динамічності і безпеки.

Мета роботи – пошук резервів для застосування відомих або розробки нових технічних рішень, способів та методів спрямованих на мінімізацію динамічних перевантажень системи, підвищення керованості, швидкодії, точності, безпеки у робочих і аварійних режимах експлуатації.

При виконанні роботи використовувалися сучасні методи технічної кібернетики, математичного аналізу, методів частотного аналізу, змінних станів, комп'ютерного моделювання, експериментальних досліджень натурних зразків і промислових випробувань дослідних зразків систем.

У результаті проведених досліджень встановлено, що сучасний розвиток технічної кібернетики і комп'ютерних методів аналізу і синтезу систем дає проектувальникам широкі можливості оптимізації динамічних параметрів системам, практично, будь якої складності і в тому числі мимтем з розподіленими параметрами. Крім відомих класичних методів параметричної і структурної оптимізації з застосуванням корегування ПІД-регуляторами для демпфірування зручними і ефективним є оптимізація керування через багатокординатний вплив на основі частотних властивостей системи.

Робота викладена на 29 сторінках, у тому числі включає 11 рисунків, - таблиць, список цитованої літератури із 54 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ФАЗОВІ (ДИНАМІЧНІ) КООРДИНАТИ РУХУ, НЕЛІНІЙНІ ВЛАВСТИВОСТІ, ГІСТЕРЕЗИС, ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ, ОБМЕЖЕННЯ КООРДИНАТ, НЕЛІНІЙНИЙ ФІЛЬТР.

## ЗМІСТ

|   | <b>с.</b> |
|---|-----------|
| <b>ВСТУП</b> .....  | 4         |
| <b>РОЗДІЛ 1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ</b> .....   | 6         |
| 1.1 Дослідження технічних характеристик приводу запобіжного гальма підіймальної установки 1×3×2У з АРЗГ клапанного типу .....                         | 6         |
| 1.2 Експериментальні дослідження динамічних характеристик приводу АРЗГ на базі РДУЗ-3 .....   | 9         |
| <b>РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ АДАПТАЦІЇ РДУЗ-3 ДО СИСТЕМ АРЗГ</b> .....  | 10        |
| 2.1 Моделювання систем керування аварійним гальмуванням .....   | 10        |
| 2.2 Комп'ютерне моделювання лінеаризації характеристик гальмівного приводу .....  | 11        |
| 2.3 Розробка структурної схеми математичної моделі удосконаленої системи АРЗГ.....  | 13        |
| 2.4 Комп'ютерне моделювання процесу запобіжного гальмування системою двобічного АРЗГ на заключному етапі стопоріння .....                             | 14        |
| <b>РОЗДІЛ 3 ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА АРЗГ З КЛАПАННИМ ПРИВОДОМ І УДОСКОНАЛЕННЯ</b>   | 16        |
| 3.1 Випробування вхідного дослідного зразка АРЗГ з клапанним приводом на підіймальної установки 1×3×2У нахилоного підйому шахти Бутівка-Донецька..... | 16        |
| 3.2 Випробування і осцилографування удосконаленого дослідного зразка АРЗГ .....   | 22        |
| <b>ВИСНОВКИ</b> .....   | 27        |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....   | 29        |

## ВСТУП

Підвищення продуктивності та безпеки експлуатації складних електромеханічних комплексів вимагає постійного вдосконалення способів керування та апаратури технічних систем. Ефективним інструментом для цього є сучасні методи експериментальних досліджень, зокрема, комп'ютерне моделювання сумісно з іншими експериментальними дослідженнями, лабораторними, натурними і промисловими випробуваннями. Математичні описи динамічних режимів сучасних складних електромеханічних систем, наприклад, шахтного підйому, з урахуванням безлічі інерційних елементів різної фізичної природи являють собою рівняння високого порядку. Зокрема, динаміка пружної частини врівноваженого шахтного підйому, з урахуванням взаємодії всіх інерційних елементів, що рухаються, може бути описана диференціальними рівняннями не нижче 8-го порядку [2,3]. Крім того в механічній системі можуть бути нелінійні елементи, в тому числі і природні, як, наприклад холостий хід механічного гальма, або гистерес статичних фазових характеристик окремих елементів. Для поліпшення динамічних властивостей необхідно компенсувати описані вище інерційні і нелінійні властивості шляхом раціонального управління. Особливо це важливе при впровадженні автоматизації деяких режимів роботи систем. Так, одним із складних динамічних режимів шахтної підйомальної установки (ШПУ) є запобіжне (аварійне) гальмування, функцію якого здійснює механічне гальмо. У сучасному шахтному підйомі використовуються радіальні (колодкові) та дискретні (багатоступінчасті дискові) системи гальмування. Механічна система гальма спільно з електромеханічним перетворювачем володіє природними нелінійними властивостями, зумовленими: холостим ходом (нечутливістю), люфтами в з'єднаннях, сухим тертям та ін. Нелінійності ускладнюють управління та апаратуру для автоматизації управління процесом аварійного гальмування.

В процесі роботи ряду промислових установок відбуваються складні енергетичні взаємодії пружних елементів з рухомими масами (моментами інерції), що погіршує динаміку, безпеку і ресурс працездатності. При цьому маси і пружності окремих ділянок можуть бути зосередженими (орган навивки або шків тертя, підймальні посудини: скіпи, кліті, вагонетки, противаги) і розподіленими (конвеєрна стрічка, сталеві тягові і гумовотросові врівноважують канати, штанги бурових установок глибокого буріння та ін.)

Керування складними електромеханічними системами з розподіленими і зосередженими параметрами, до яких, наприклад, відносять підймальні установки і ліфти, в умовах інтенсифікації, вимагає формування керуючих впливів, що забезпечують необхідну якість керованості у перехідних режимах роботи, мінімізацію динамічних перевантажень в елементах систем.

За матеріалами зарубіжних джерел глибина шахтного підйому досягла 2000 м і більше, вантажопідймальність судин зросла до 75 т, швидкість підйому - до 20 м / с, потужність електроприводів становить 5-10 тис. КВт. Наприклад, в шахтних підймальних установках з висотою підйому 1000 м, при стопоренні підйальної машини механічним гальмом амплітуда коливань кінцевих вантажів досягає 1 м.

Динамічні перевантаження, що виникають в режимі запобіжного гальмування, можуть призводити до прискорення зносу обладнання, а неконтрольовані прослизання канатів по шківів тертя – до аварійних ситуацій.

Проблема зниження динамічних перевантажень в механічних вузлах машин в критичних режимах може бути вирішена шляхом формування раціональних управляючих впливів на механічну систему апаратурою автоматично регульованого гальмування. При цьому апаратура повинна реалізувати алгоритм, що враховує динамічні властивості електромеханічної системи.

# РОЗДІЛ 1

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ

### 1.1 Дослідження технічних характеристик приводу запобіжного гальма підйомальної установки 1×3×2У з АРЗГ клапанного типу

Протягом 80-90х років серед цікавих и наукоємких тем в галузі автоматизації керування шахтними підйомальними установками науково-дослідницькими інститутами “Автоматвуглерудпром” НВО ”Червоний металіст”, спільно з НДПКТІ ВО “Донецькгірмаш” проводилася розробка та впровадження в серійне виробництво ряду систем автоматично регульованого запобіжного гальмування (АРЗГ) і вибіркового (АВЗГ) ШПУ. Обидві гальмівні системи за існуючими Правилами безпеки мали клапанний привід одностороннього регулювання гальмівного зусилля у бік збільшення, тобто нелінійно. Тому системи АРЗГ технічним завданням передбачалася точність підтримки заданого уповільнення запобіжного гальмування у межах  $\pm 20\%$ . Основним фактором при цьому були високочастотні перешкоди від вібрації низькочастотні коливання в кривій частині підйому. Для забезпечення необхідної безпеки системою передбачалося двоканальне незалежне регулювання гальмування. Як електромеханічний перетворювач використовувалися по 3 електроклапани в кожному каналі з дросельованими отворами вихлопу. Причому один із клапанів використовувався для форсування часу холостого ходу (природна нелінійність на початку процесу) і в кінці для стопоріння, а два інших в замкнутій системі одностороннього автоматичного регулювання уповільнення. В процесі розробки декілька модифікацій апаратури успішно пройшли промислові випробування, за їх результатами було зроблене удосконалення системи. Зокрема, принцип одностороннього регулювання гальмівного зусилля за заданим уповільненням був з метою підвищення надійності, точності та безпеки був удосконалений технічними рішеннями регулювання уповільнення за заданою швидкістю з

урахуванням впливу холостого ходу. Нелінійний регулятор дозволив забезпечити перерегулювання на заданому рівні. Було проаналізовано резерви вдосконалення системи та зроблено висновок, що у ШПУ глибокого підйому вплив низькочастотних коливань пружної частини може бути ефективно компенсований двостороннім регулюванням. Зокрема, на завершальній ділянці перед стопорінням незначне зниження гальмівного зусилля за параболічним законом дуже ефективно покращує динаміку підйомної установки. Що забезпечує додатковий ресурс обладнання. Тому було ухвалено рішення провести серію досліджень, пов'язаних із можливостями застосування близького до лінійного двостороннього регулювання гальмівного зусилля шляхом переходу від клапанних виконавчих механізмів до електромеханічних перетворювачів типу “струм – гальмівне зусилля”.

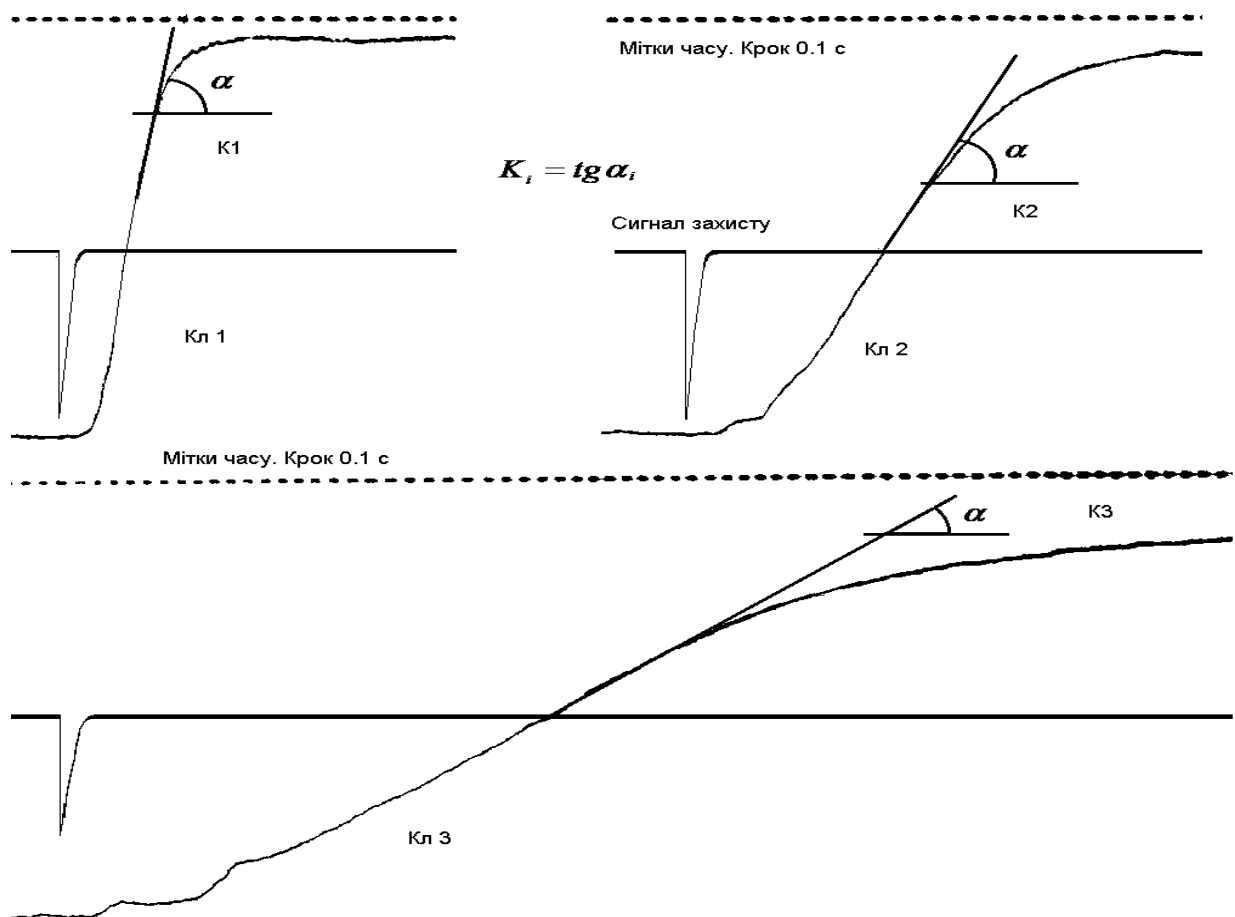


Рис. 1.1 Перехідні характеристики виходу робочого тіла з гальмівного циліндру через електромагнітні клапани приводу де  $K_i = \text{tg } \alpha_i$

Промислові випробування системи АРЗГ однобічної дії де застосовано привод гальма клапанного типу пройшли випробування на підймальній установці 1×3×2У нахилоного вантажного підйому шахти “Бутівка-Донецька”.

## 1.2 Експериментальні дослідження динамічних характеристик приводу АРЗГ на базі РДУЗ-3

В рамках підготовки проведення робіт по удосконаленню і розробки нових систем АРЗГ у лабораторії електричних машин та приводів автоматичного устаткування в інституті "Автоматвуглерудпром" проводились дослідницькі випробування з дослідження динамічних характеристик електромеханічного перетворювача "струм-тиск" РДУЗ-3. Цей перетворювач призначений для керування приводами гальмування ШПМ в широкому діапазоні зусиль, використая при цьому сигнал постійного струму в діапазоні значень 100 мА. Пристрій представляє багатокаскадний перетворювач, до складу якого входить лінійний електромагнітний привід, сопло-заслінка, мембранний підсилювач та золотниковий механізм. Він був розроблений у двох модифікаціях, з падаючою та висхідною характеристикою. Перехідні і фазові характеристики пристрія зняті на відповідному лабораторному обладнанні лабораторії і наведені на рис. 1.2 та 1.3.

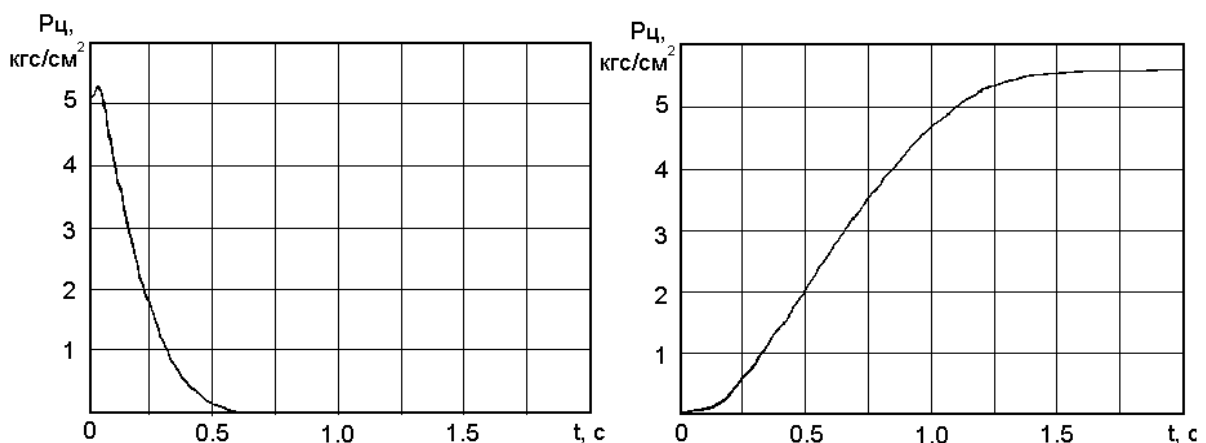


Рис. 1.2. Перехідні характеристики регулятора тиску РДУЗ-3



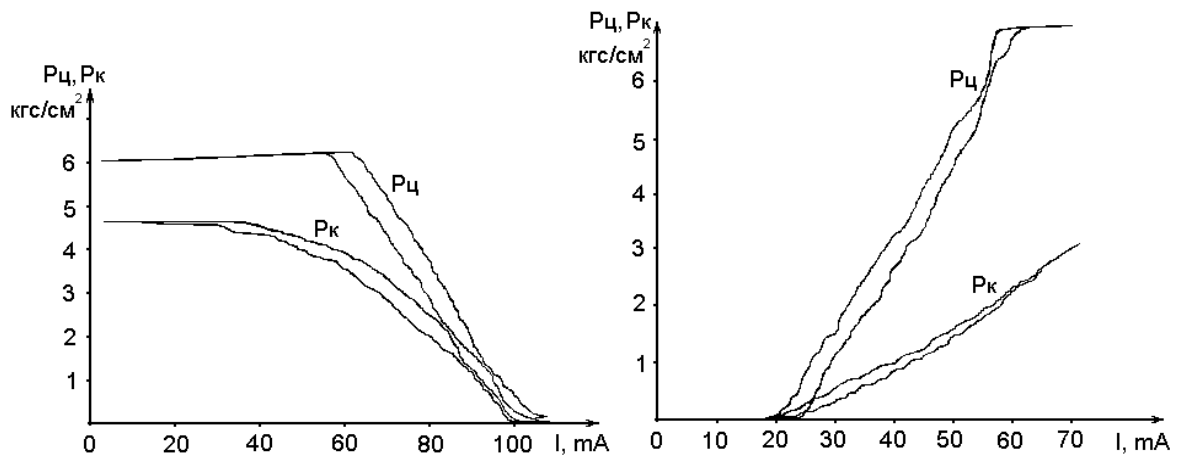


Рис. 1.3. Фазові характеристики регулятора тиску РДУЗ-3 з падаючою та висхідною характеристикою.  $P_{\text{к}}$  і  $P_{\text{ц}}$  відповідно тиску в камері перетворювача і в гальмівному циліндрі.

Аналіз результатів показав характер і кількісні резерви якості пристрою при використанні його в системі автоматичного керування. Також особливість фазових характеристик пов'язана з природною петльовою нелінійністю (гістерезис), що пояснюється наявністю люфтів, сухого тертя в механічних вузлах і, зокрема, в перетворювачі.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ АДАПТАЦІЇ РДУЗ-3 ДО СИСТЕМ АРЗГ

#### 2.1 Моделювання систем керування аварійним гальмуванням

Для дослідження автоматично регульованого запобіжного гальмування підйомної установки з лінеаризованим гальмівним пристроєм складається математичну модель системи. За її основу прийнято модель, описану в [2]. Структурна схема моделі замкненої системи АРЗГ з приводом запобіжного гальма на основі описаного чи неаризованого пристрою наведена на рис. 5.

Ця модель дозволяє враховувати вплив основних збурень на підйомну машину в процесі аварійного гальмування: час природного холостого ходу гальмівного пристрою на початку процесу, вплив пружної частини підйому в процесі уповільнення, можливість зниження динамічних перевантажень в момент зупинки. На структурній схемі підйомна машина (ПМ) представлена інтегруючим ланкою, на вхід якого впливає результуюче зусилля: гальмівного  $F_T$ , статичного навантаження  $\pm F_{ст}$ , результуючого зусилля впливу пружної частини системи  $F_{\Sigma}$ . Вихідним параметром системи є сигнал швидкості руху підйомної установки  $U_v$ . До структурної схеми також включені моделі підсистем: пружної частини підйомної установки (канати); запобіжного гальма (нелінійна і лінійна частини) і автоматичного управління (апаратура АРЗГ).

#### 2.2 Комп'ютерне моделювання лінеаризації характеристик гальмівного приводу

На основі проведених експериментальних досліджень представлених на рис. 1.2 і 1.3 отримані перехідні характеристики гальмівного приводу, параметри яких визначають необхідні амплітудні і часові параметри електричних сигналів для керування. Фазові характеристики гальмівної системи мають нелінійні властивості. Причому характер нелінійності неоднозначний, з гістерезисними властивостями, тому потребує лінеаризації.

При використанні такого пристрою в замкнутій системі автоматики його петльова нелінійність у поєднанні з інерційними властивостями механічної системи створює умови для виникнення автоколивань, погіршує надійність, безпеку та швидкодію системи. При ручному управлінні гальмуванням оператором неоднозначність фазової характеристики також створює незручності.

Для адаптації перетворювачів до необхідних умов були розроблені технічні рішення способу [6] і на його основі пристрою для компенсації петльової нелінійної інерційності приводу гальма. Компенсація здійснюється шляхом формування на привід дискретних впливів з постійною амплітудою та періодом, та використанням принципу широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Період слідування впливів прив'язаний до сталої часу механічної системи. Структурну схему моделі пристрою наведено на рис. 2.1.

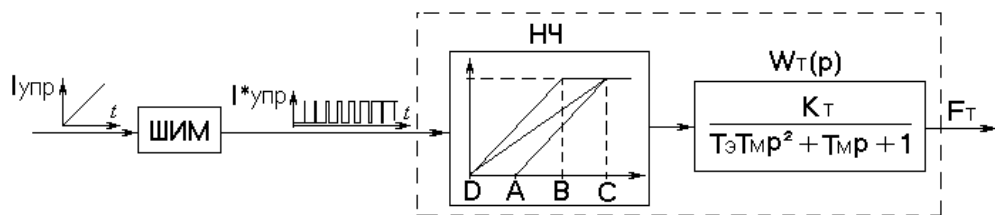


Рис. 2.1. Структурная схема модели линеаризованного механического объекта с петлевой инерционностью.

На структурній схемі механічний привод гальма умовно представлений нелінійною частиною (НЧ), і лінійною частиною, апроксимованою динамічною ланкою другого порядку  $W_t(p)$ , де:  $K_t$  - коефіцієнт передачі, що враховує конструкційні особливості пристрою;  $T_e$  і  $T_m$  - відповідно електрична та механічна стали часу. У цій спрощеній моделі не враховані особливості реального перетворювача, що має в залежності від напрямку руху різні сталі часу і які можуть бути враховані при розробці та налаштуванні апаратури управління на конкретній системі.

На основі наведеної структурної схеми з параметрами, відповідними експериментальним характеристикам розроблений математичний опис, який реалізований програмно комп'ютерною моделлю лінеаризації властивостей

електромеханічної системи гальма. Для зручності моделювання та розширення функціональних можливостей використання даних при випробуваннях натурних діючих зразків і порівняння з результатами експерименту її реалізовано у вигляді графіків динамічних та фазових характеристик.

Розроблений і захищений авторским свідоцтвом спосіб керування і на його основі пристрій [6-7] використовує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) впливів на гальмівний пристрій. Відповідно до наведеної на рис. 2.1 структурною схемою математичної моделі розроблено програму цифрового і комп'ютерного моделювання для керування пристроєм з природною петлевою інерційною нелінійністю. Нелінійний елемент моделює петлеву нелінійність гальмівної системи, що включає електромеханічний перетворювач (регулятор тиску) та кінематичні властивості механічного гальма. Динамічні властивості механічної частини апроксимовані передавальною функцією ланки другого порядку.

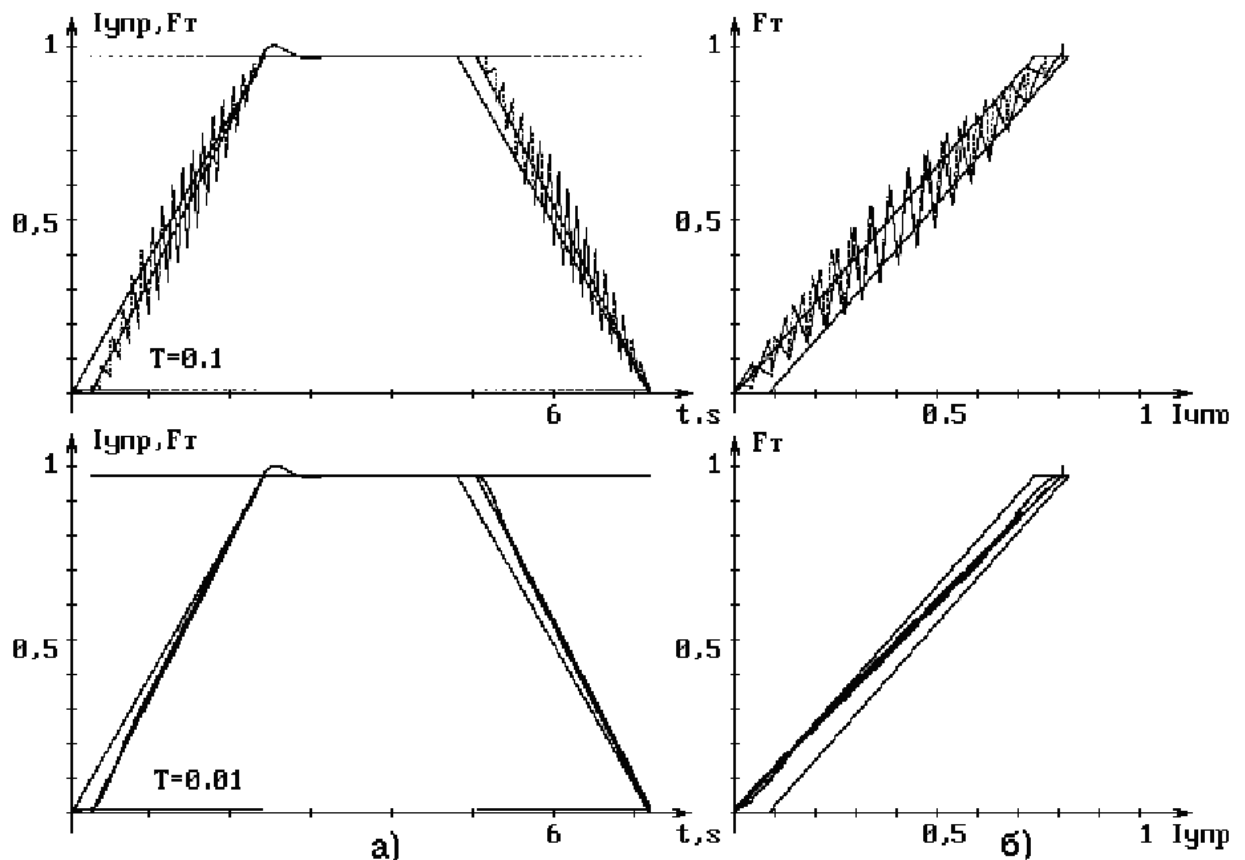


Рис. 2.2. Моделювання лінеаризованої системи ШІМ при  $T=0.1$  та  $T=0.01$ . а) перехідні показники  $F_T(t)=f(1)$ . б) фазові характеристики  $F_T = f(I_{upr})$ .

На рис. 2.2 представлені результати комп'ютерного моделювання перехідних та фазових характеристик гальмівної системи з сталою часу  $T_m \approx 1c$  для несучих частот управління ШІМ з періодами  $0.1c$ , частота ( $10Гц$ ) і  $0.01c$  ( $100Гц$ ). Внесення ШІМ-сигналу в керування ефективно компенсує гістерезис в приводі гальма.

### 2.3 Розробка структурної схеми математичної моделі удосконаленої системи АРЗГ

На основі отриманих результатів при комп'ютерному моделюванні і проведених експериментальних дослідженнях в умовах промислових випробувань системи АРЗГ з клапанним приводом гальма, що описано в розділі 3 розроблено структурну схему системи двобічного регулювання запобіжним гальмуванням з лінеаризованою характеристикою регулятора тиску в якості приводу. Реалізація пропонованого проєкта дасть ефективне зниження динамічні перевантаження в аварійних режимах, в тому числі на заключному етапі стопоріння. Що є суттєвим для вертикальних багатоканатних підймальних установок зі шкивом тертя.

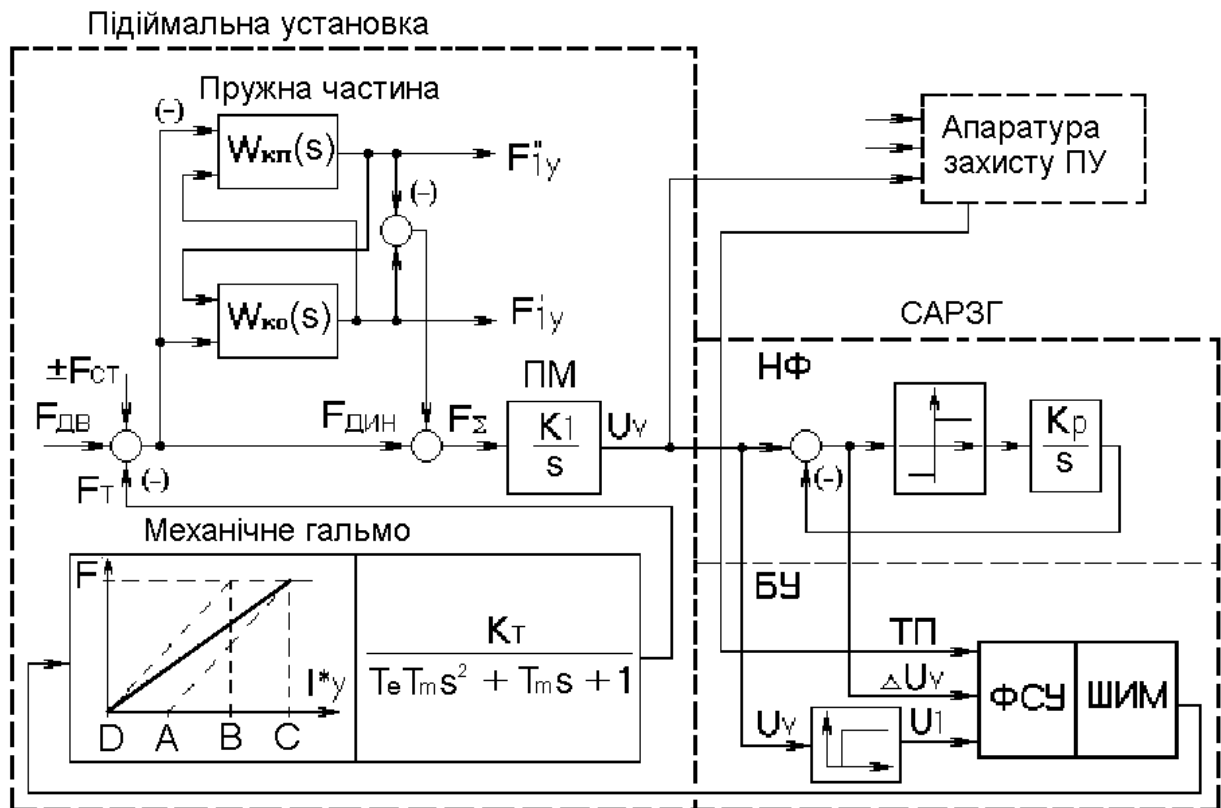


Рис. 2.3. Функціональна схема системи АРЗГ двобічного регулювання запобіжним гальмом ШПУ.

## 2.4 Розробка технічних рішень по удосканаленню системи АРЗГ

При створенні систем АРЗГ виникає низка суперечливих вимог щодо швидкодії та безпеки запобіжного гальмування, пов'язанної із зменшенням динамічних перевантажень [18,19,20]. Зокрема, деякі режими роботи багатоканатних ШПУ зі шкивом тертя вимагають підбирати раціональні дії, що управляють, на гальмівну систему, щоб не допустити прослизання канатів по шківу тертя. Для цього важливо не допустити великих амплітуд зусиль в пружній частині підйому, зокрема, в режимі спуску при крайніх положеннях судин, коли максимальна довжина пружних гілок. Це стосується процесу, на заключному етапі, коли при досягненні нульової швидкості стрибкоподібно змінюється уповільнення.

Результат комп'ютерного моделювання запобіжного гальмування в режимі спуску вантажу по структурній схемі рис. 2.3 представлений на рис. 2.4.

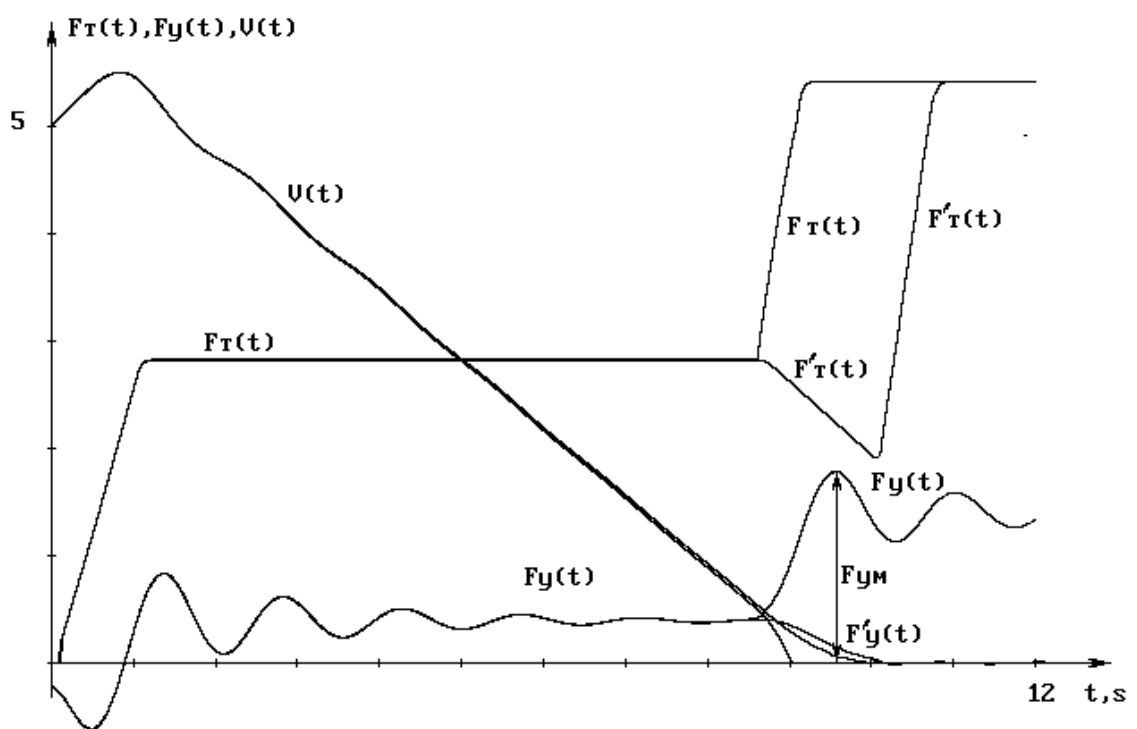


Рис. 2.4. Часові діаграми комп'ютерної моделі системи АРЗГ у режимі спуску вантажу.

Діаграми фіксували дійсну швидкість підйомної машини  $V(t)$ ; результуючі зусилля в пружній частині підйому за різних режимів гальмування на заключній ділянці  $F_Y(t)$ ,  $F'_Y(t)$ ; гальмівне зусилля з жорстким стопорінням при досягненні

мінімальної швидкості  $F_t(t)$ ; гальмівне зусилля із створенням параболічної діаграми швидкості на заключній ділянці гальмування  $F'_t(t)$ .

Як видно з діаграм найбільші динамічні навантаження в пружній частині виникають у початковий момент гальмування при збільшенні гальмівного зусилля до необхідного значення і в кінці перед стопорінням після досягнення мінімальної швидкості, коли зусилля в пружній частині досягають максимальної величини  $F_{ум}$ . Покращення динаміки для цього режиму можна отримати незначним лінійно зниженим гальмівним зусиллям, тоді діаграма швидкості на заключній ділянці підпорядковуватиметься параболічному закону [3]. Практично реалізувати цей спосіб можна, якщо досявши мінімально безпечної швидкості (наприклад, 0.3-0.5 м/с) підйомної машини лінійно зменшити гальмівне зусилля протягом невеликого проміжку часу до величини не менше статичного навантаження  $F_{ст}(t)$ . Це забезпечить відсутність можливих коливань, пов'язаних із реактивним перерозподілом енергії між масами та пружними елементами системи та надасть перехідним процесам аперіодичного характеру. При досягненні нульового уповільнення та швидкості гальмівне зусилля наростає до максимального значення, що відповідає трьом статичним моментам. Такий режим за рахунок суттєвого зниження динамічних перевантажень у режимі запобіжного гальмування суттєво покращить довговічність обладнання та безпеку підйомної установки загалом. При цьому незначне збільшення часу запобіжного гальмування може бути враховано при налагодженні засобів захисту.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА АРЗГ З КЛАПАННИМ ПРИВОДОМ І УДОСКОНАЛЕННЯ

#### 3.1 Випробування вхідного дослідного зразка АРЗГ з клапанним приводом на підймальній установці 1×3×2У нахилоного підйому шахти Бутівка-Донецька

Системи запобіжного гальмування шахтних підйомних установок [8] повинні забезпечувати однаковий режим гальмування під час підйому та спуску вантажу, що у ряді випадків не дозволяє виконати всі вимоги Правил безпеки та обмежує підвищення продуктивності підйомних установок. Для зняття цих обмежень запропоновано автоматизувати цей процес за допомогою систем регульованого запобіжного гальмування (АРЗГ). Один з дослідних зразків, розроблених інститутами "Автоматвуглерудпром" НВО "Червоний металіст" і "НПКТІвуглегормаш" ВО Донецькгірмаш проходив випробування на нахилому вантажному підйомі шахти "Бутівка-Донецька" ПО Донецьквугілля [3, 4]. За їхніми результатами система АРЗГ успішно пройшла промислові випробування і була рекомендована до серійного виробництва для підйомних установок даного класу.

Система АРЗГ призначена для управління діючими приводами пружинно-пневматичного гальмівного пристрою, а також для управління багатоступінчастим дисковим гідравлічним гальмом підйомних установок.

Функціональна схема вхідного зразка системи АРЗГ представлено на рис. 3.1. Барабан 1 шахтної підйомної машини (ШПМ) має гальмо 2 з пружинами 3. Розгальмовування ШПМ проводиться подачею робочого тіла (стисненого повітря) в циліндр 4 гальмівного приводу. У нормальному режимі електромагніт 6 клапана запобіжного гальмування (КПТ) включений і клапан 5 встановлений у положення, вказане в нижньому квадраті: циліндр 4 з'єднаний з магістраллю, що веде до регулятора тиску (РД).



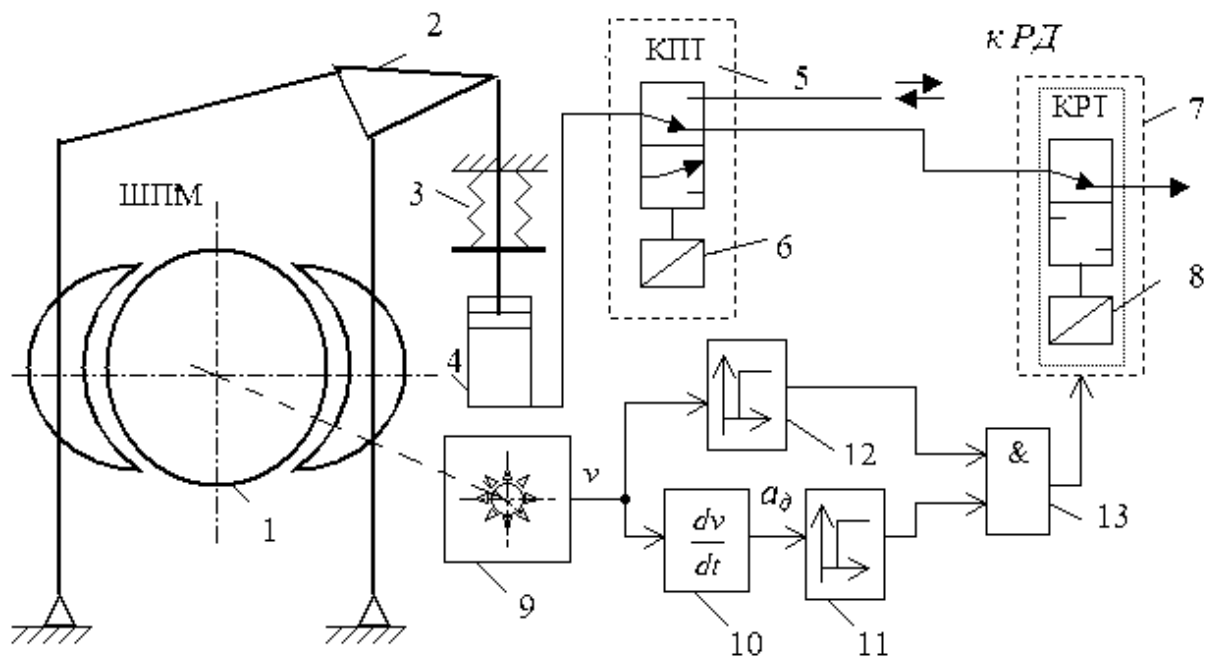


Рис. 3.1 – Функціональна схема вхідного дослідного зразка системи АРЗГ:

1- барабан ШПМ; 2 – гальмо; 3 – пружинний блок гальма;

4 – робочий циліндр гальмівного приводу; 5, 6 – електромагніт та клапан запобіжного гальмування (КПТ); 7, 8 – електромагніт та клапан регулювання гальмування (КРТ); 9 – імпульсний датчик; 10 – датчик уповільнення; 11 -  $a_d > a_z$ ; 12 – компаратор,  $v_d > v_{мин}$ ; 13 - логічний елемент "І"

Оператор керує регулятором тиску рукояткою з пульта та регулює величину гальмівного зусилля.

При запобіжному гальмуванні електромагніт 6 відключається ланцюгом захисту підйомної установки, клапан 5 встановлюється в положення, зазначене верхнім квадратом. Робоче тіло з циліндра 4 надходить до клапана 7 регулювання гальмування (КРТ). Електромагніт 8 в момент запобіжного гальмування відключається, і клапан 7 встановлюється в положення, зазначене верхнім квадратом. Робоче тіло з пневмо-/гідроциліндра 4 виходить в атмосферу / ємність. За наявності гальмівного зусилля, що створюється гальмом 2, відбувається уповільнення барабана, швидкість підйомної машини знижується. Справжня швидкість підйомної машини вимірюється імпульсним датчиком 9, пов'язаним з барабаном підйомної машини.

Сигнал швидкості надходить на цифровий датчик 10 уповільнення, що виконує функцію диференціювання швидкості. З його виходу сформований

сигнал уповільнення пекло надходить на вхід блоку порівняння 11 і порівнюється із заданим уповільненням  $a_z$ . При уповільненні  $a_d > a_z$  з виходу блоку порівняння на вхід логічного елемента "І" 13 надходить сигнал керування електромагнітним клапаном на його включення і тим самим зупинення зростання гальмівного зусилля. При цьому блоком порівняння 12 контролюється дійсна швидкість підйомної машини  $v_d$  і порівнюється з мінімальною  $v_{min}$ . При швидкості  $v_d > v_{hv}$  сигнал з виходу блоку порівняння надходить на вхід логічного елемента "І" 13, на інший вхід якого надходить сигнал з блоку 11. В результаті наявності сигналів на виходах блоків 11 і 12 вихідний сигнал з блоку 13 включає електромагніт 8. КРТ перемикається в положення, показане нижнім квадратом. Випуск повітря з циліндра 4 припиняється і встановиться постійне гальмівне зусилля, при якому швидкість підйомної машини знижуватиметься з уповільненням, що визначається доданим у цей момент гальмівним зусиллям і величиною статичного навантаження. При досягненні швидкості значення  $v_d = v_{min}$  зникає сигнал з виходу блоку 12 і електромагніт 8 відключається. Клапан перемикається на випуск робочого тіла з циліндра 4 і при повному виході з циліндра встановлюється повне гальмівне зусилля і підйомна машина стопориться.

Якщо в процесі гальмування при включеному електромагніті 8, з яких-то причин, уповільнення зменшується і стає менше заданого, сигнал на виході блоку 13 зникає і починається додатковий вихід робочого тіла з циліндра і процес регулювання (збільшення) гальмівного зусилля продовжиться до досягнення умови  $a_d > a_z$ , при якому сигналом блоку 13 клапан закривається.

Описана система АРЗГ – односторонньої дії і відповідно до ПБ вона може працювати лише на збільшення гальмівного зусилля, поки темп зниження швидкості нічого очікувати відповідати заданому уповільненню. При цьому підймальна установка розглядалась як одномасова система уповільнення якої змінюється монотонно. Проведені під час промислових випробувань дослідження показали, що на динаміку ШПУ суттєво впливає її пружна частина і тому, підймальну установку необхідно розглядати як багатомасову систему, в якій за певних умов виникають динамічні явища, що впливають на керування.

Конструктивно система АРЗГ складається з гальмівної панелі та системи керування запобіжним гальмом при спрацюванні сигналу захисту. Гальмівна панель для пружинно-пневматичного гальмівного пристрою складається з регулятора тиску, що працює від рукоятки машиніста в робочому режимі, трьох електромагнітних клапанів, керованих системою АРЗГ в режимі запобіжного гальмування та електромагнітних клапанів, що перемикають гальмівну панель з робочого в аварійний режим. Перший електромагнітний клапан призначений для скорочення часу холостого ходу механічного гальма і працює протягом певного заданого часу в момент спрацьовування ланцюга захисту підйомної установки, а два інших вищеназваних КРТ призначені для регулювання витрати робочого тіла в гальмівних циліндрах і, отже, швидкості наростання гальмівного зусилля. Для цього клапани мають задріпані вихідні отвори і працюють тільки в режимі випуску робочого тіла з гальмівних циліндрів. При вимиканні клапана гальмівне зусилля зростає, при включенні – його зупиняється. Тобто гальмівне зусилля у процесі регулювання можна лише збільшувати, а зменшити його не можна. Призначення системи АРЗГ – забезпечення сталості уповільнення у всіх режимах роботи – під час підйому та спуску вантажу з точністю  $\pm 20\%$ . Вибір виконавчого механізму клапанного типу продиктований підвищеними вимогами Правил безпеки аварійного гальмування.

Структурну схему вхідної, за технічним завданням, системи АРЗГ, що відповідала лабораторному макету замовника представлено на рис. 3.2, а. Схема складається з інтегруючої ланки, яка в режимі запобіжного гальмування з коефіцієнтом  $K_1$  моделює функцію зміни швидкості підйомальної машини і враховує наведені до осі барабана моменти інерції всіх частин підйомальної установки, що обертаються. Для простоти, схема не враховує вплив окремих характеристик підйомальної установки, зокрема пружної частини, природної нелінійності, що є в гальмівному пристрої: зону нечутливості (холостий хід), гістерезис характеристики гальма та ін. Відповідно, не відображена на схемі робота першого клапана, ” час холостого ходу. Сигнал швидкості руху підйомної машини  $U_v$  знімається з датчика швидкості, фрикційно пов'язаного з полем

гальмівним барабаном підйомної установки. Цей сигнал перетворюється диференціюючим ланкою сигнал  $U_{ад} = \frac{dU_{вд}}{dt}$ , порівнюється із заданим уповільненням  $U_{аз}$ . Сигнал неузгодженості  $\Delta U$  управляє регулятором, який вимикає або включає електромагнітні клапани і тим самим регулює збільшення гальмівного зусилля  $F_t$ . Регулятор у схемі представлений нелінійними ланками – компараторами, кожен з яких налаштовується на певний поріг уповільнення, яке виходи підключені до входів інтеграторів, які є моделями виконавчих механізмів – електромагнітних клапанів. Коефіцієнти інтеграторів  $K_2$  та  $K_3$  пропорційні площам відповідних дросельних отворів електромагнітних клапанів. Підключена до виходів інтеграторів через суматор аперіодична ланка зі сталим часом  $T_m$  моделює інерційність механічного гальма. На рисунку 3.2.б представлений один з результатів осцилографування випробувань системи АРЗГ в режимі спуску декількох завантажених вагонеток.

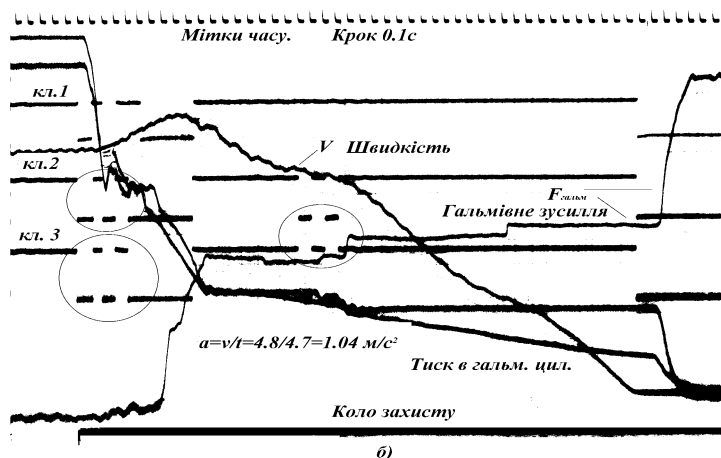
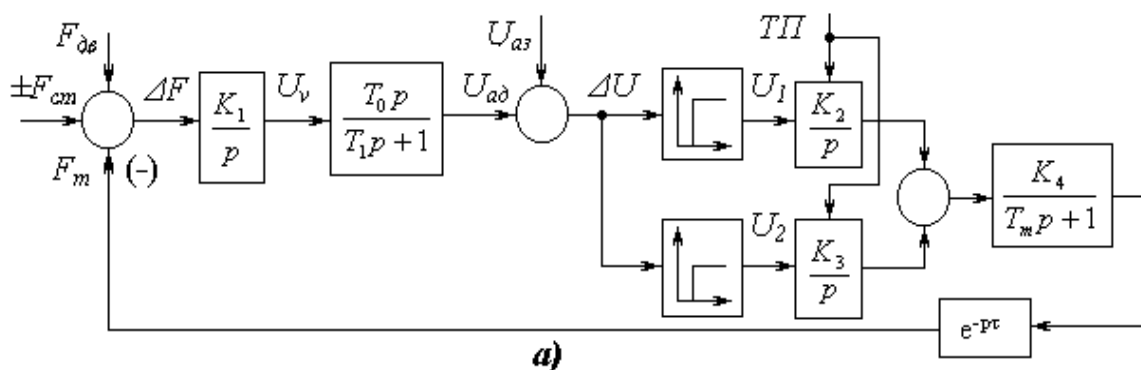


Рис. 3.2. а) структурна схема моделі вхідного дослідного зразка замкнутої системи АРЗГ з клапанним приводом запобіжного гальма (гальмування в функції контролю заданого уповільнення), б) діаграми осцилографування запобіжного гальмування в режимі спуску вантажу.

Розроблений и створені НВО “Червоний металіст” дослідні зразкі АРЗГ проходили промислові випробування на двох ШПУ Донбасу. На нахиленому вантажному підйомі ш. “Бутівка-Донецька” і вертикальному врівноваженому багатоканатноиу підйомі зі шкивом тертя, обладнаним 8-ми-модульним (східчастим) дисковим гальмом ш. ім. ІХ п'ятирічки. Обидва підйоми з точки зору динаміки відносяться до складних систем по вантажопідйомності і глибині порядку 1000м. При цьому найбільш складні режими, нахиленого – підйом вантажу (можливість аварійного набігання вагонеток на ослаблений канат і динамічний зворотний ривок). Для вертикального врівноваженого, складним є випадок коли протилежні, вантаж і противага знаходяться на протилежних кінцях стволу, що створює небезпечні умови для низькочастотних коливань з суттєвими значеннями амплітуд і створює умови просклізання канатів по шкиву тертя, як це змодельоване в підрозділі 2.4.

Випробування показали ряд суттєвих недоліків вхідних технічних рішень системи. Так за заданої точності 20% система була схильна до перерегулюванню уповільнення из-за низької завадостійкості по високо і низько частотним завадам. Прийшли до висновку, що отримання величини уповільнення/прискорення шляхом диференціювання сигналу швидкості має низьку якість і точність через високочастотні завади від вібрацій, биття шестерень редуктору тощо. Також додавали помилок низькочастотні завади пружної частини. Тому було прийняте рішення відмовитися від контролю уповільнення і перейти до контролю швидкостей за заданим уповільненням і з урахуванням впливу холостого ходу на задану швидкість. Також для мінімізації умов понадрегулювання уповільнення доцільно введення гистерезису при керуванні виконавчими клапанами.

### 3.2 Випробування і осцилографування дослідного зразка АРЗГ

За результатами випробувань і аналізу резервів, що надавала була отримана удосконалена структурна схема керування уповільнення за заданою швидкості з контролем швидкості [9,10,11].

Заданий закон підтримання уповільнення по швидкості реалізований нелінійними фільтрами  $H\Phi 1$  і  $H\Phi 2$ . При чому задана уповільність включення 2-го і 3-го клапанів, а також прискорення вільного вибігу в час холостого ходу гальма під впливом вантажу визначається уставками обмежень елементами типу “обмеження” і  $K_{pi}$ .

Високочастотні перешкоди у механічних вузлах підіймальної установки внаслідок вібрацій, що виникають, при контакті гальмівних колодок з барабаном, зіткнень шестерень у редукторі та інших факторів. Наявність у вимірювальній системі диференціюючого пристрою, що має великий коефіцієнт посилення на високих частотах, сприяє цьому, погіршує перешкодостійкість і точність системи.

Низькочастотні перешкоди є амплітуди коливань зусиль пружної частини підйомної установки, які впливають на процес одностороннього збільшення гальмівного зусилля, що також призводить до погіршення точності системи.

Для покращення системи необхідно мінімізувати вплив зазначених перешкод. Аналіз осцилографування показав, що найбільше впливають високочастотні перешкоди. Низькочастотні перешкоди на однокінцевому підйомі проявляються за умов великих глибин підйому. При цьому в системах одностороннього регулювання враховувати та пригнічувати їх досить складно. Для вертикальних врівноважених підйомних установок з односторонньою системою регулювання таке придушення можливе з огляду на частотні властивості пружної частини. Зокрема, застосування низькочастотного нелінійного фільтра другого порядку дозволяє пригнічувати високочастотні перешкоди, враховувати холостий хід гальмівного пристрою і відстежувати коливання амплітуд низькочастотної складової сигналу уповільнення вище заданого рівня і формувати збільшення гальмівного зусилля. Однак, як правило, зміни гальмівного зусилля провокують нові коливання пружної частини системи.

Тому, при удосконаленні системи був обраний спосіб зниження впливу низькочастотних перешкод, при якому до закону регулятора було включено нелінійність типу "гістерезис". При цьому відключення та включення клапанів здійснюються на різних рівнях уповільнення. Цей порівняно не складний метод показав цілком задовільні результати на однокінцевих підйомах.

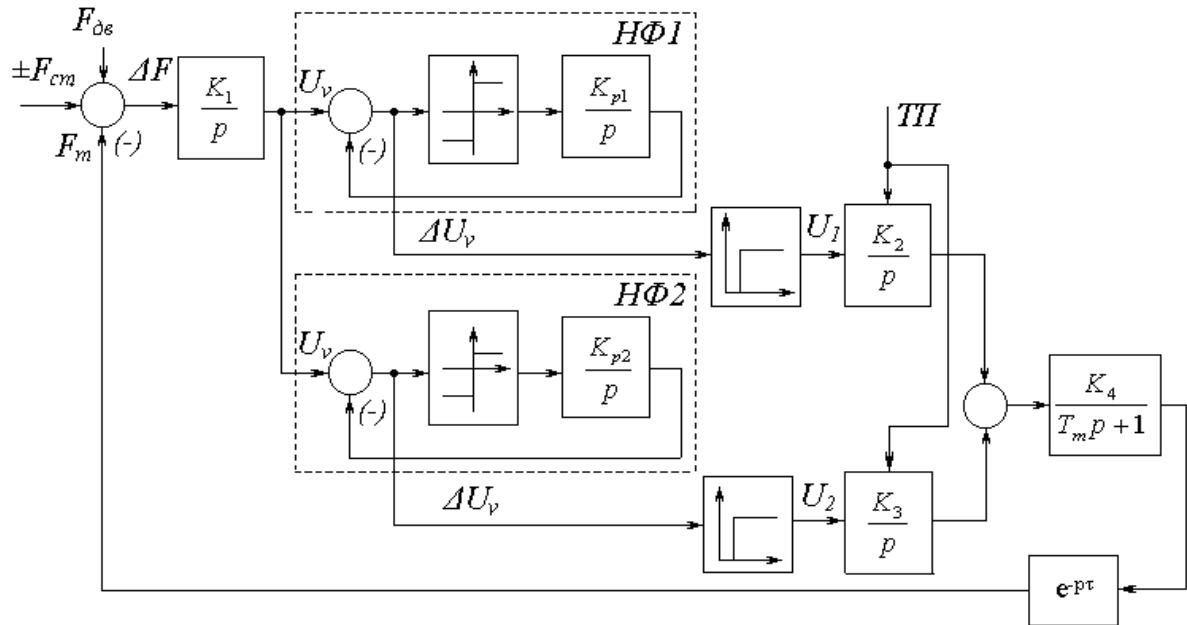


Рис. 3.3. Структурна схема моделі удосконаленого дослідного зразка замкнутої системи АРЗГ з клапанним приводом запобіжного гальма (гальмування в функції контролю заданої швидкості із застосуванням нелінійних фільтрів)

Мінімізація високочастотних перешкод за допомогою їхньої фільтрації призвела б до зниження швидкодії та інших характеристик системи. Більше ефективно виключення із законів управління функцій диференціювання, і шляхом зниження порядку похідної і перейти на регулювання швидкості за заданим уповільненням. У цьому випадку системі необхідно в момент вимкнення двигуна запам'ятовувати значення дійсної швидкості і від нього за заданим уповільненням обчислити заданий закон зміни швидкості та порівнювати по ньому дійсну швидкість. При цьому елемент пам'яті ускладнить систему регулювання, але головний недолік такого способу полягає в тому, що при спуску вантажу, в момент відключення двигуна і наявності холостого ходу гальма швидкість підйомної установки під дією статичного навантаження може збільшитися і це може призвести до перерегулювання гальмівного зусилля. Щоб контролювати

зміну швидкості під час холостого ходу гальма, необхідно врахувати початкові умови: статичне навантаження, напрямок руху (спуск, підйом вантажу), швидкість, прискорення тощо. Це також ускладнює систему. Тому, з метою поліпшення точності та надійності системи управління була розроблена, досліджена та змодельована на АОМ система АРЗГ із зворотним зв'язком за швидкістю [3], [9].

Особливістю даної системи є подача сигналу, пропорційного дійсній швидкості, гальмівне пристрій через нелінійні фільтри першого порядку. Коефіцієнти  $Kp1$  і  $Kp2$  інтеграторів визначають задані значення уповільнення відповідно до першого і другого ступенів гальмування. На виходах інтеграторів формуються сигнали заданої швидкості при уповільненні та прискоренні. Ці сигнали порівнюються із сигналом дійсної швидкості. Темп наростання гальмівного зусилля знижується, коли дійсна швидкість стає меншою за задану на відповідному ступені гальмування і стає рівним нулю, коли дійсна швидкість досягає заданого уповільнення. Ланка запізнення моделює затримку роботи гальма в початковий момент гальмування, зумовлене наявністю в ньому холостого ходу. Структурну схему удосконаленого зразка системи АРЗГ і результати осцилографування її [4] представлені в на рис. 3.3 а,б.

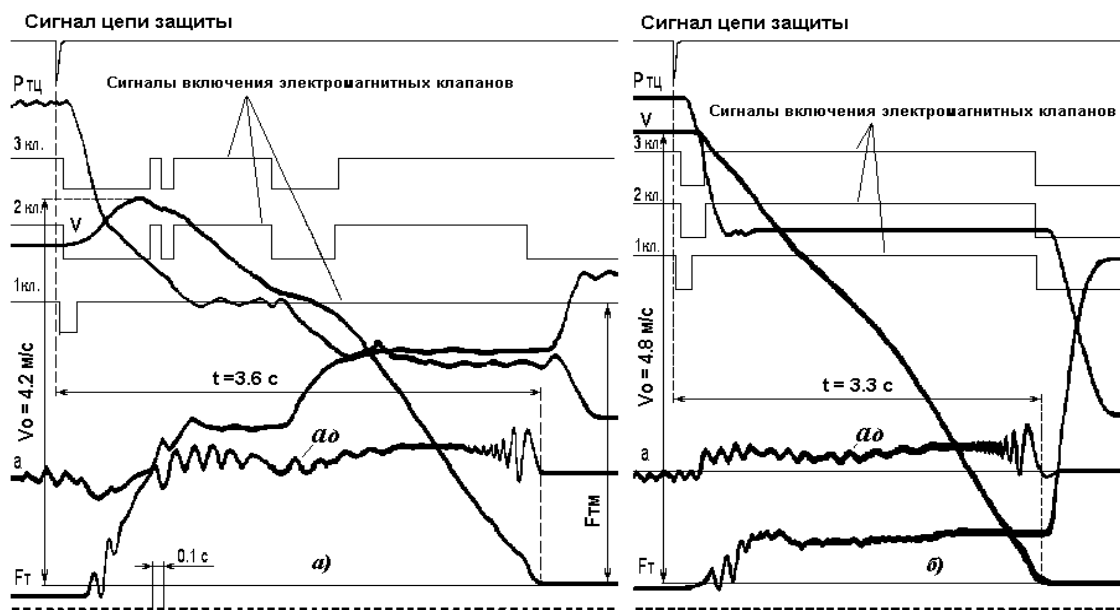


Рис. 3.4. Часові діаграми осцилографування запобіжного гальмування в режимі спуску (а) і підйому (б) вантажу.



Принцип формування заданої швидкості шляхом перемикання законів наростання та зниження за допомогою нелінійного фільтра та осцилограми моделі такої системи АРЗГ на АОМ, що відповідають запобіжному гальмуванню при спуску вантажу, наведено на рис. 3.3. Як видно з характеристик, пристрій стежить за змінами швидкості під час холостого ходу і змін швидкості від впливу пружних сил в канатах. При виході на режим заданого уповільнення, коли дійсна швидкість трохи менша за задану уповільнення, відбувається зупинка зростання гальмівного зусилля. Чергове включення запобіжного гальма відбувається при зменшенні уповільнення, коли  $V_d(t) > V_z(t)$  або досягнення мінімальної швидкості стопоріння  $V_d(t) < V_{min}(t)$ . Такий принцип АРЗГ з урахуванням впливу пружної частини моделювався на АОМ, були показані задовільні результати. Тому наведений принцип було покладено основою розробки документації настановної серії апаратури АРЗГ. Апаратуру було виготовлено, налагоджено та випробувано на шахті "Северо-Пещанская" Богословського р/у ПО Уралруда (Росія). При цьому було показано результати, що відповідають заданим технічним характеристикам.

Осцилограми запобіжного гальмування промислового зразка системи АРЗГ, удосконаленої за принципом, описаним у цьому розділі, зняті на шахті "Северо-Пещанская", наведені в [13].

Таким чином, якщо коефіцієнт  $K_1$  вибрати рівним одиниці, то коефіцієнти, що визначають вплив зусиль  $\pm F_{ст}$ ,  $F_T$ ,  $F_\Sigma$  на підйомну установку дорівнюватимуть відноsinам відповідних зусиль до сумарної маси рухомих частин установки, приведеної до осі обертання шківа тертя ( барабана). Такі параметри відповідають реальному об'єкту моделювання.

Процес запускається сигналом запобіжного гальмування ТП, що формується апаратом захисту при виникненні будь-якої аварійної ситуації: відключення електроенергії, порушення в роботі електрообладнання, невідповідність параметрів руху захисній діаграмі швидкості та ін.

Апарат управління АРЗГ призначений для контролю та підтримки процесу запобіжного гальмування ШПУ із заданим уповільненням. Логіка роботи апарату полягає в контролі процесу і регулюванні уповільнення.

Контроль здійснюється у функції заданої швидкості, яка формується нелінійним фільтром (НФ) [3,4,9]. Застосування такого формувача знижує порядок похідної контрольованої змінної, підвищуючи перешкодостійкість системи від високочастотних вібрацій. Крім того, дозволяє формувати задану швидкість з урахуванням природного впливу холостого ходу гальма в початковий момент роботи системи та враховувати вплив низьких частот пружної частини системи (канатів) на процес роботи системи, щоб при необхідності скоригувати параметри уповільнення сигналами АРЗГ.

Формувачем сигналів управління (ФСУ) формуються впливи, пропорційні неузгодженню між заданою і дійсною швидкістю. Далі сигнали модулюються ШІМ і надходять на керування електромеханічним перетворювачем.

Для зниження динамічних перевантажень на заключному етапі гальмування процес контролюється датчиком мінімальної швидкості, за сигналом якого перед зупинкою діаграма заданої швидкості переводиться з лінійної траєкторії на параболічну, відповідну природним динамічним властивостям системи ШПУ.

Система АРЗГ може також використовуватися в розімкнутій адаптивній системі регулювання, описаної в [3]. Такий режим зручно використовувати для зниження динамічних перевантажень від пружної частини в системах врівноважених ШПУ, до яких відносять багатоканати зі шківками тертя. У цьому випадку немає необхідності використання ШІМ, оскільки в цьому режимі регулювання спрямоване на зниження динамічних перевантажень шляхом компенсації впливу інерційності пружної частини ШПУ за рахунок одномоментного формування раціонального закону регулювання, перетворення його в сигнали впливу на систему.

## ВИСНОВКИ

Розглянуто методику розробки апаратури для покращення системи автоматично регульованого запобіжного гальмування ШПУ шляхом застосування в системі перетворювача з нелінійною петлевою інерційністю. На підставі результатів експериментальних досліджень, знайдені закономірності, розроблено спосіб і технічні рішення для лінеаризації природних петлевих інерційних властивостей виконавчого механізму та проведено комп'ютерні моделювання. Розроблена модель підсистеми включена в модель апробованої і впровадженої в серійне виробництво системи автоматично регульованого запобіжного гальмування ШПУ. Проаналізовано можливості застосування апаратури для замкнених і розімкнених систем автоматики. Двостороннє регулювання гальмівного зусилля електромеханічним приводом, сформоване у вигляді сигналів АРЗГ на основі раціонального закону, виключає динамічні навантаження в системі. Тим самим покращуються експлуатаційні характеристики системи, її безпека та надійність.

Проведені дослідження сучасних методів мінімізації динамічних перевантажень шляхом демпфірування зусиль і коливань в складних системах в перехідних режимах дозволяють зробити наступні висновки.

1. Демпфування методом параметричної оптимізації за рахунок зниження загального коефіцієнта передачі має обмежену сферу застосування по швидкодії і точності систем.

2. Класичні методи, пов'язані з підняттям або придушенням вищих і середніх частот (зазвичай з використанням стандартних ПД-регуляторів) ефективні, але не універсальні.

3. Досліджені і комп'ютерно змодельовані динамічні процеси і режими руху деяких елементів і способи компенсації їх інерційності і лінеаризації характеристик [7,11].

4. Випробування показали, що в замкнутих системах автоматичного регулювання використання сигналом зворотного зв'язку похідної що отримується шляхом диференціювання сигналу датчика іншої функції руху, що контролюється, а саме швидкості не раціональне, тому що підвищує інерційність системи. Особливо це важливе для аварійних режимів складних систем, де інерційність суперечить швидкодії і надійності [4, 9-12].

5. В результаті аналізу результатів промислових випробувань дослідних зразків розроблені ряд технічних рішень, які виявили джерела ресурсів для підвищення якості систем і оптимізації її динамічних режимів [20, 21]. Зокрема, застосування способу багатокординатного керування ефективно компенсує інерційні властивості складних систем, сприяє керованості системи в критичних за часом умовах, дає можливість використання його в керуваннях високоточних швидкодіючих систем високого порядку складності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев // М.: Машиностроение, 1985. – с. 155.
2. Чермалых В. М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
3. Васильев В.І. Обґрунтування раціональних динамічних параметрів запобіжного гальмування шахтних підймальних установок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.09 – “Динаміка та міцність машин” / Васильев Володимир Іванович; Сумський держ. ун-т. – Суми, 2012. – 20с.: іл. – Бібліогр.: с. 17-18.
4. Протокол осциллографирования режимов предохранительного торможения подъемной машины 1×3×2У с АРПТ к "Акту приемки комплекса автоматически регулируемого предохранительного торможения шахтных подъемных машин (АРПТ)". ПО Донецкгормаш, Донецк, 13.09.1983 г.
5. Блэкборн Дж. Ф. Гидравлические и пневматические системы управления / Дж. Ф. Блэкборн, Г. Ритхоф, Дж. Л. Шерер //– М.: ИИЛ, 1962. – 612 с.
6. А. с. № 1715705 СРСР, МКІ 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.
7. Васильев В.І. Компенсация нелинейной петлевой инерционности для систем предохранительного торможения шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Вісник національного технічного університету України "КПІ". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2012. - вип. 48. - С. 126-133.
8. Зайцев Г.Ф. Компенсация естественных нелинейностей автоматических систем / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов //– М.: Энергоиздат., 1982. – 94 с.
9. А.с. № 1296500 СССР, МКІ В 66 В 5/00 / Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Чермалых В.М., Васильев В.И., Матвиенко Н.П. Открытия. Изобретения.- 1987. - № 10.

10. 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. - № 48.

11. Васильев В.И. Застосування нелінійних фільтрів в системі управління запобіжним гальмуванням підйомних установок / В.И. Васильев, Л. А. Козьякова, Е. І. Алтухов // Укр. Київ. політехн. ін-ту. Гірнична електромеханіка та автоматика. - К.: 1984. - Вип. 15. - С. 13 - 15.

12. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». М.: Высш. шк., 1989. — 263 с: ил.

13. 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.

14. Васильев В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами [Текст] // Адаптивні системи автоматичного керування. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – Реж. дост.:<http://asac.kpi.ua/article/view/29085> .

15. Васильев В.И. Дослідження способів оптимального керування динамічними системами. [Текст] / В.И. Васильев, Є.В. Васильев // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2014: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 11–16 березня 2014 р.) – Київ: 2014. — С. 51-53.  
[http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/260/RTPSAS\\_2014\\_s2\\_t2.pdf](http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/260/RTPSAS_2014_s2_t2.pdf)

16. 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](https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_may1.pdf)

17. Vasyliiev, V.I. The method for optimal control of high precision quick scanning system. [Текст] / V.I. Vasyliiev, E.V. Vasyliiev // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2019: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18–24 листопада 2019 р.) - Київ: 2019. — С. 147-149.  
[http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS\\_2019\\_s5\\_t04.pdf](http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS_2019_s5_t04.pdf)

18. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.

19. Васильев В. І. Комп'ютерне дослідження динаміки зупинки ШПУ при запобіжному гальмуванні / В. І. Васильев // Вісник Сум ДУ. Серія Технічні науки, 2011, №1 - С. 84-88.

20. Спосіб гальмування шахтної підйимальної установки. Патент України на винахід UA114179 / В.І.Васильев, Є.В.Васильев // – Київ.:ДП “УІПВ” (Укрпатент), опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.

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

22. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М., Наука, Гл. ред. ф.-м. литер. / 1975. –768 с.

23. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. // – 12th ed. – 2011. – 1082 p.

24. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

25. Ажогин В.В. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ / В.В. Ажогин, М.З. Згуровский // – К. : Вища школа., 1982. – 280 с.

26. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e082.htm>

27. Абакумов В.Г. Электронные промышленные устройства. Киев, изд. ”Вища школа”, 1978, 376 с.

28. Vasyliiev, V.I. The method for optimal control of high precision quick scanning system. [Текст] / V.I. Vasyliiev, E.V. Vasyliiev // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2019: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18–24 листопада 2019 р.). - Київ: 2019 – с.147-149

[http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS\\_2019\\_s5\\_t04.pdf](http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS_2019_s5_t04.pdf)

29. Васильев В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами [Текст] // Адаптивні системи автоматичного керування. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – Режим доступу: <http://asac.kpi.ua/article/view/29085> .

30. Александровский Н.М. Элементы теории оптимальных систем автоматического управления // – М.: Энергия, 1969. – 128 с.

31. Дорф Р. К., Бишоп Р. Х. Современные системы управления. М : Лаборатория базовых знан., 2004. 832 с.

32. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М., Наука, Гл. ред. ф.-м. литер. / 1975. –768 с.

33. <https://root-nation.com/news-ua/it-news-ua/ua-quantum-accelerometer/> дата доступу: 19.05.2023 р.

34. <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/11/01/129859> дата доступу: 19.05.2023 р.

35. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 606 с.

36. Гук М. Интерфейсы ПК. Справочник: СПб: ЗАО «Издательство «Питер», 1999 416 с

37. Ан Пей. Сопряжение ПК с внешними устройствами: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 320 с.: ил.

38. Смит Дж. Сопряжение компьютеров с внешними устройствами. Уроки реализации: Пер. с англ.- М.: Мир, 2000. – 266 с., ил.



39. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ./Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с., ил.

40. Васильев, В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами [Текст] // Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – <http://asac.kpi.ua/article/view/29085> , дата доступу: 19.05.2023 р.

41. Траубе Е. С. Тормозные устройства и безопасность шахтных подъемных машин / Е. С. Траубе, И. С. Найденко // – М. : Недра, 1980, – 256 с.

42. Подлесный Н. И., Рубанов В. Г. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов //– К.: Вища школа., 1982. – 472 с.

43. Зубчук В.И. и др. Справочник по цифровой схемотехнике. – К. Техника, 1990.

44. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Цифрова схемотехніка”. КіСумДУ, 2006.

45. Католиков В.Е. Автоматизированный электропривод подъемных установок глубоких шахт / В.Е. Католиков, А.Д. Динкель, А.М. Седуниин // – М. : Недра, 1983. – 270 с.

46. Степанов А.Г. Аварийное торможение подъемных установок сверхглубоких шахт. Горное оборудование и электромеханика №7, 2014 г., с. 33-41.

47. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.

48. Васильев В.И. Регуляторы давления для систем регулируемого предохранительного торможения / В. И. Васильев, Н. П. Матвієнко // Механізація і автоматизація виробництва., 1990, № 11.- С. 25-27.

49. А. с. № 1680614 СРСР, МКІ В 66 В 1/32 5/00 / Пристрій для управління приводом гальма шахтної підйомної машини / Чермалих В. М., Васильєв В. І., Матвієнко Н. П. // Відкриття. Винаходи. - 1991. Бюл. № 36.

50. Литягин В. Ф. Построение системы управления предохранительным торможением ШПМ з многоступенчатым дисковым тормозом / В. Ф. Литягин, В. І. Васильєв // Уголь Украины - 1989. - № 7. - С. 23 - 24.

51. Васильєв В. І. Комп'ютерне моделювання запобіжного гальмування шахтної підйомної установки / В. І. Васильєв // АСУ та прилади автоматики: Всеукр. Міжвід. н.-техн. зб. - 2002. - Вип. 121. - С. 48-51.

52. Васильєв В. І. Вибір раціональних законів керування методом цифрового моделювання / В. І. Васильєв // Зб. наукових праць за матеріалами 8-й Міжнародній науковій конференції "Теорія і техніка передачі, прийому і обробки інформації" "ИИСТ-2002" "- 17-19 вересня 2002 г.: - Харків: ХНУРЕ, 2002. - С. 429-431.

53. Сиденко А. Ф. Аппаратура управления тормозными приводами шахтных подъемных машин / А. Ф. Сиденко, А. П. Солоха, Б. С. Роженцов // - М.: Недра, 1974. - 226 с.

54. Дьяконов В. П. Довідник по алгоритмів і програм на мові Бейсік для персональних ЕОМ / В. П. Дьяконов // - М.: Наука, 1989. - 239 с.