

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Рожков Петро Павлович

УДК 629.114.2

МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ПЛАВНІСТЮ ХОДУ МОБІЛЬНИХ МАШИН І АГРЕГАТІВ  
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2004

ДИСЕРТАЦІЮ Є РУКОПИС.

Робота виконана в Харківському державному технічному університеті сільського господарства Міністерства аграрної політики України, м. Харків.

- Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Фурман Ілля Олександрович,  
Харківський державний технічний університет сільського господарства,  
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Любчик Леонід Михайлович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри комп'ютерної математики і математичного моделювання;
- кандидат технічних наук, доцент  
Михайлов Андрій Георгійович,  
Національний аерокосмічний університет ім.  
М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, доцент кафедри авіаційних приладів та вимірювань
- Провідна установа - Національний аграрний університет Кабінету Міністрів України,  
м.Київ.

Захист відбудеться “\_4\_” \_листопада\_ 2004 р. о \_13\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: м.Харків, 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “\_28\_” \_вересня\_\_ 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Голоскоков О.Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному агропромисловому комплексі України широко застосовується різна мобільна сільськогосподарська техніка. Аналіз ефективності її застосування свідчить про те, що основні втрати врожаю утворюються при виконанні нею транспортно-технологічних операцій, які в багатьох випадках складають невід'ємну і найбільш трудомістку частину технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. Частка транспортних операцій в виробничих процесах вирощування та збирання сільськогосподарських культур складає: для зернових культур 42 - 44%, цукрового буряка 39 - 41, кукурудзи на силос 40 - 41%. Поряд з цим, під час транспортування виникають втрати продуктів врожаю, які для зернових складають 2%, картоплі - 6%, овочів - 5%, цукрового буряка - 6%. Однією з головних причин виникнення втрат при виконанні транспортно-технологічних операцій є коливання підресореної маси, порушені нерівностями опорної поверхні в процесі перевезень. Крім того, вертикальні коливання вкрай негативно впливають на стан деталей і вузлів. У результаті впливу коливань міжремонтний пробіг зменшується на 15 - 20%, а собівартість транспортних операцій збільшується на 25 - 30%. Тому виникає необхідність підвищення плавності ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні ними транспортно-технологічних операцій.

Рішення задачі підвищення плавності ходу традиційно шукалось на шляху демпфірування коливань. Однак, на відміну від недавнього минулого, коли підвищення ефективності демпфірування в підвісці зв'язувалося з удосконалюванням її конструкції в цілому й окремих елементів зокрема, у теперішній час перспективним напрямком стало створення мікропроцесорних систем автоматичного керування підвіскою.

Досвід створення й експлуатації таких підвісок довів їхню доцільність при роботі машин у широкому діапазоні швидкостей і в різних польових і дорожніх умовах. У той же час стало очевидно, що такі підвіски не виправдали повною мірою пов'язаних з ними надій. Як показує аналіз, це відбулося тому, що в основу побудови автоматично керованих підвісок були покладені характерні для конструкторських розробок спрощені математичні моделі коливань і використовувалися виконавчі пристрої, отримані в результаті модернізації традиційних амортизаторів та ресор. Тому подальше удосконалення мікропроцесорних систем автоматичного керування підвіскою, а отже, і забезпечення плавності ходу в складних умовах агропромислового комплексу може бути забезпечене за рахунок розробки більш точних математичних моделей, що адекватно відбивають процес руху об'єкта керування, а також за рахунок застосування виконавчих пристроїв, здатних реалізувати відповідні алгоритми керування.

Вищевикладене дозволяє зробити висновок, що дослідження, спрямовані на удосконалювання систем автоматичного керування підвіскою мобільних машин і агрегатів з метою підвищення плавності ходу, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до науково-технічної програми Міністерства агропромислового комплексу України від 30.12.1998 року, № 339 "Науково-дослідні і дослідницько-конструкторські розробки", комплексної програми розвитку сільського господарства Харківської області в 2001-2005 роках і на період до 2010 року (Розділ 5. Технічна політика "Науковий супровід реалізації пропозицій комплексної програми") і на підставі комплексного плану наукових досліджень Харківського державного технічного університету сільського господарства (ДР №01.86.0032093). Проведені дослідження виконувалися в рамках договорів про науково-технічне співробітництво з ВАТ "Харківський тракторний завод" ("ХТЗ"), Казенним підприємством "Харківське конструкторське бюро машинобудування ім. О.О. Морозова" (Державне підприємство "Завод ім. Малишева"), Науковим метрологічним центром (військових еталонів), м. Харків. У відзначених роботах здобувач проводив дослідження у якості співробітника.

Мета і задачі дослідження. Метою даного дослідження є удосконалення математичних

моделей і засобів автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні ними транспортно-технологічних операцій сільськогосподарського виробництва в різних польових і дорожніх умовах.

Досягнення поставленої мети передбачає рішення наступних задач:

- розробка математичної моделі коливань багатоосних мобільних машин і агрегатів як об'єктів автоматичного керування в поздовжній і поперечній площинах при статистичному поданні збурюючого впливу;
- проведення параметричної оптимізації автоматично керованої підвіски мобільних машин і агрегатів;
- аналіз характеристик і розробка математичної моделі виконавчого пристрою системи автоматичного керування;
- параметрична ідентифікація динамічної системи підвіски у процесі автоматичного керування;
- розробка архітектури мікропроцесорної системи автоматичного демпфірування коливань мобільних машин і агрегатів;
- оцінка функціонування розробленої мікропроцесорної системи автоматичного керування за обраним критерієм плавності ходу.

Об'єктом дослідження є процес керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні ними транспортно-технологічних операцій сільськогосподарського виробництва.

Предметом дослідження є моделі і засоби реалізації мікропроцесорної системи автоматичного керування демпфіруванням коливань мобільних машин і агрегатів.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач досягнуте шляхом застосування методів операторного перетворення Лапласа (при визначенні передавальних функцій), статистичної динаміки (при розрахунку дисперсій прискорення коливань), спектрального аналізу (при визначенні параметрів збурюючого впливу та параметричній ідентифікації підвіски), енергетичної лінеаризації (при побудові математичної моделі виконавчого пристрою). Результати експериментальних досліджень оброблялися за допомогою методу найменших квадратів.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконання дисертаційної роботи були розроблені математичні моделі, методи і засоби реалізації автоматично керованої підвіски, що забезпечують необхідну плавність ходу мобільних машин і агрегатів в різних експлуатаційних умовах, а саме:

- подальший розвиток одержала математична модель коливань підвіски у виді передавальних функцій, що на відміну від існуючих моделей, розповсюджується на багатоосні мобільні машини і агрегати;
- дано оцінку величини дисперсії прискорення коливань в будь-якій точці підресореної маси багатоосної динамічної системи, яка на відміну від існуючих, враховує взаємні вертикальні та поздовжньо-кутові коливання у поздовжній площині;
- уперше побудована математична модель автоматично керованого пневматичного амортизатора з магнітною ридиною (ПАМ);
- обґрунтоване застосування ПАМ як електромеханічного виконавчого пристрою в системі автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів;
- розроблений алгоритм адаптивного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів у процесі виконання транспортно-технологічних операцій.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень є науковою основою для їхнього практичного застосування з метою поліпшення плавності ходу мобільних машин і агрегатів у сільськогосподарському виробництві. Розроблені математичні моделі коливань підвіски багатоосних мобільних машин і агрегатів, алгоритми і програми розрахунку характеристик підвіски використані при розробці перспективних моделей мобільних машин і дослідженні їх експлуатаційних характеристик у ВАТ "ХТЗ" і КП "ХКБМ ім. О.О. Морозова".

Використання автоматично керованої підвіски забезпечує зниження величини диспе-

рсії прискорення підресореної маси на 9-35%, в залежності від експлуатаційних умов. Достовірність отриманих результатів підтверджена імітаційним моделюванням.

Окрему практичну цінність мають теоретичні дослідження та проведені стендові випробування електромеханічного виконавчого пристрою мобільних машин і агрегатів – автоматично керованого пневматичного амортизатора з магнітною рідиною. Отримана математична модель ПАМ дозволяє використовувати його в якості керованого демпфіруючого елемента не тільки для автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів в АПК, але й у будь-яких системах автоматичного керування технологічними процесами.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати, приведені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У спільних наукових працях за темою дисертації здобувачеві належить:

- розробка математичної моделі у виді передавальних функцій коливань багатоосних мобільних машин і агрегатів в поздовжній площині;
- проведення параметричної оптимізації підвіски мобільних машин;
- розробка математичної моделі пневматичного амортизатора з магнітною рідиною;
- побудова регульовальних характеристик ПАМ;
- проведення параметричної ідентифікації динамічної системи підвіски мобільних машин і агрегатів;
- визначення параметрів спектральної щільності різних типів доріг.

Апробація результатів дисертації. Положення дисертації і результати досліджень доповідалися на науково-технічних та науково-практичних конференціях, серед яких 7 міжнародні: міжнародна науково-практична конференція "Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України" (Харків, ХДТУСГ, 2-3 жовтня 2003 р.), міжнародна науково-технічна конференція "Автомобільний транспорт в ХХІ веке" (Харків, ХНАДУ, 2003 р.), міжнародна науково-практична конференція "Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України" (Харків, ХДТУСГ, 9-10 жовтня 2002р.), міжнародна науково-технічна конференція "Енергетика в АПК" (Мелітополь, ТДАТА, 16-20 вересня 2002 р.), міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми меха-троники у подальшому розвитку транспортних засобів і систем" (ХНАДУ, 16-18 жовтня 2001 р.), щорічні науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу ХДАДТУ протягом 1997- 2001 р., IV міжнародна науково-технічна конференція "Автомобільний транспорт: Проблеми і перспективи" (Севастополь, 4-8 вересня 2000 р.), міжнародна конференція "Ергономіка на автомобільному транспорті" (Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет, 18 листопада 1997 р.).

Публікації. Основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковані в матеріалах 10 наукових праць, з них 2 статті у наукових журналах і 8 статей у збірниках наукових праць.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, одного додатку. Повний обсяг дисертації становить 162 сторінки основного тексту, 62 рисунки, 5 таблиць і 119 найменувань використаних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі виконаний аналітичний огляд робіт, що досліджують вплив коливань мобільних машин і агрегатів на якість реалізації ними транспортно-технологічних операцій у сільськогосподарському виробництві і проаналізовані методи та засоби поліпшення плавності ходу.

З аналізу літературних джерел відомо, що виконання транспортно-технологічних операцій у сільськогосподарському виробництві пов'язане з значними втратами продуктів рослинництва, які виникають внаслідок впливу на них коливань мобільних машин і агрегатів.

Виникнення коливань обумовлене незадовільним станом сільських доріг та особливостями опорної поверхні, де виконуються с.-г. роботи. Це призводить до значного зниження експлуатаційних швидкостей мобільних машин і агрегатів, а тому зменшує економічну ефективність їх використання.

Проведений у роботі аналіз показав, що основною підсистемою мобільних машин і агрегатів, яка визначає плавність ходу, є підвіска. Причому як критерій плавності ходу доцільно вибрати зменшення величини прискорення підресореної маси, оскільки ця величина, як адитивна складова, входить практично в усі розглянуті критерії.

Протягом багатьох років поліпшення плавності ходу досягалося шляхом удосконалення конструкції підвіски. В результаті досліджень, проведених такими вченими, як Р.В. Ротенберг, М.Н. Яценко, О.К. Прутчиков, Я.М. Певзнер, М. Mitshke, И.Г. Пархилковский, М.С. Bekker, А.О. Силаев, А.А. Хачатуров, Г.О. Смирнов, А.Д. Дербаремдикер, Є.Є. Александров, Л.І. Гром-Мазничевський, отримані певні успіхи щодо питань, пов'язаних з створенням конструкцій, які забезпечують достатньо високий рівень плавності ходу мобільних машин.

Значні наукові та практичні результати отримав В.Я. Анілович, який розробив статистичну теорію підресорювання машинно-тракторних агрегатів та запропонував конструкцію підвіски з механічним дискретним регулюванням жорсткості.

Запропонована дисертаційна робота спрямована на подальше розвинення ідеї використання керованої підвіски, але на новій теоретичній і технічній основі в напрямку створення системи автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів.

Наявність в арсеналі розроблювачів транспортних засобів сучасних вільно програмованих універсальних і спеціальних мікропроцесорних засобів дозволяє проектувати ефективні системи автоматичного керування багатьма вузлами мобільних машин і агрегатів, у тому числі й підвіскою. При цьому ефективність роботи мікропроцесорних систем керування в основному визначається якістю математичної моделі, що лежить в основі алгоритму керування, і параметрами виконавчого пристрою.

З огляду на вищесказане, визначена мета дослідження як удосконалення математичних моделей і засобів автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні ними транспортно-технологічних операцій сільськогосподарського виробництва в різних польових і дорожніх умовах.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити ряд задач, головними з яких є: розробка математичної моделі коливань, що відрізняється від застосовуваних моделей більшою адекватністю реальному об'єкту і кращим можливостям у частині керованості підвіски; розробка і дослідження виконавчого пристрою, здатного реалізувати необхідні керуючі впливи; створення мікропроцесорної системи автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів.

В другому розділі розроблені математичні моделі коливань підресореної маси багатоосних мобільних машин і агрегатів в поздовжній і поперечній площинах з метою побудови системи автоматичного керування плавністю ходу.

Особливість цих моделей полягає в аналітичному визначенні залежності значення критерію плавності ходу від параметрів підвіски і збурюючого впливу. Це дозволяє при виконанні транспортно-технологічних операцій с.-г. виробництва проводити параметричну оптимізацію підвіски і в залежності від умов руху належним чином автоматично змінювати її параметри.

Обрана сукупність допущень дозволила вважати коливання мобільних машин і агрегатів в поздовжній площині незалежними від коливань у поперечній площині. У поздовжній площині підресорена маса робить вертикальні лінійні і поздовжньо – кутові коливання. З метою забезпечення максимального узагальнення розглядаються багатоосні мобільні машини і агрегати.

Відповідно до обраної розрахункової схеми запишемо систему диференціальних рівнянь, що описують вертикальні і поздовжньо-кутові коливання

$$\left. \begin{aligned} M_p \ddot{z} + \dot{z} \sum_{i=1}^n 2\mu_i + z \sum_{i=1}^n 2c_i + \dot{\theta} \sum_{i=1}^n 2\mu_i \ell_i + \theta \sum_{i=1}^n 2c_i \ell_i &= \sum_{i=1}^n 2(\mu_i \dot{x}_i + c_i x_i); \\ J_y \ddot{\theta} + \dot{\theta} \sum_{i=1}^n 2\mu_i \ell_i^2 + \theta \sum_{i=1}^n 2c_i \ell_i^2 + \dot{z} \sum_{i=1}^n 2\mu_i \ell_i + z \sum_{i=1}^n 2c_i \ell_i &= \sum_{i=1}^n 2(\mu_i \dot{x}_i + c_i x_i) \ell_i; \\ m_i \ddot{x}_i + 2\mu_i \dot{x}_i + 2c_{0i} x_i - \dot{z} 2\mu_i - z 2c_i - \dot{\theta} 2\mu_i \ell_i - \theta 2c_i \ell_i &= 2c_{hi} q_i, \end{aligned} \right\} (1)$$

де  $i=1 \dots n$ ;  
 $n$  – кількість осей;  
 $c_{0i} = c_i + c_{hi}$ .

Розв'язання системи рівнянь (1) в операторній формі дозволило одержати передатні функції  $W_z(p)$  і  $W_\theta(p)$ , а потім і частотні характеристики  $W_z(j\omega)$ ,  $W_\theta(j\omega)$

$$W_z(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 \sum_{m=1}^n e^{-j\omega\tau_m} \sum_{i=0}^{2n+1} B_{mi}(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^{2n+4} A_i(j\omega)^i}; \quad (2)$$

$$W_\theta(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 \sum_{m=1}^n e^{-j\omega\tau_m} \sum_{i=0}^{2n+1} C_{mi}(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^{2n+4} A_i(j\omega)^i}, \quad (3)$$

де  $A_i, B_{mi}, C_{mi}$  - коефіцієнти поліномів, що функціонально залежать від параметрів підвіски.

Зображення по Лапласу збурюючого впливу, діючого на  $i$ -у вісь, представлено з урахуванням запізнювання щодо впливу на першу вісь у виді

$$Q_i(p) = Q_1(p) \cdot e^{-j\tau_i}, \quad (4)$$

де  $\tau_i = \frac{(\ell_1 - \ell_i)}{v_a}$  - величина запізнювання;

$v_a$  - швидкість руху.

Головною особливістю АЧХ є полімодальність у широкому діапазоні частот, що свідчить про можливість виникнення квазірезонансних коливань підресореної маси зі значними величинами прискорень при наявності в мікропрофілі періодичних нерівностей.

Система диференціальних рівнянь, яка відповідає обраній розрахунковій схемі, з використанням операторів Лапласа має вид

$$\left. \begin{aligned} (p^2 + r_{31}p + r_{30})\psi(p) &= r_{32} \sum_{i=1}^n (\mu_i p + c_i) \Delta x_i(p); \\ (m_i p^2 + \mu_i p + c_{0i}) \Delta x_i(p) &= c_{hi} \Delta q_i(p), \end{aligned} \right\} (5)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $c_{0i} = c_i + c_{hi}$ ;

$$\Delta x_i(p) = x_{in}(p) - x_{il}(p); \quad \Delta q_i(p) = q_{in}(p) - q_{il}(p);$$

$$r_{30} = \frac{B^2}{2J_X} \sum_{i=1}^n c_i; \quad r_{31} = \frac{B^2}{2J_X} \sum_{i=1}^n \mu_i; \quad r_{32} = \frac{B}{2J_X}.$$

В результаті розв'язання системи рівнянь (5) одержимо передатну функцію  $W_\psi(p)$  і потім частотну характеристику  $W_\psi(j\omega)$

$$W_\psi(j\omega) = \frac{(j\omega^2) \sum_{m=1}^n e^{-j\omega\tau_m} \sum_{i=0}^{2n-1} D_{mi}(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^{2n+2} R_i(j\omega)^i}. \quad (6)$$

де  $D_{mi}, R_i$  - коефіцієнти поліномів, що функціонально залежать від параметрів підвіски;  $\tau_m$  - величина запізнювання дії збурюючого впливу на  $m$ -ю відносно першої вісь.

Амплітудно-частотна характеристика  $|W_\psi(j\omega)|$  має полімодальний характер і свідчить про можливість виникнення квазірезонансних поперечних коливань у широкому діапазоні частот.

Дисперсія прискорень коливань у будь-якій точці  $E$  підресореної маси знайдена в такий спосіб

$$D_{\ddot{z}_E} = D_{\ddot{z}_C} + a_E^2 D_{\ddot{\theta}} + b_E^2 D_{\ddot{\psi}} + 2a_E D_{\ddot{z}_C \ddot{\theta}}, \quad (7)$$

де  $D_{\ddot{z}_E}$  - дисперсія прискорень коливань підресореної маси в точці  $E$ ;

$D_{\ddot{z}_C}$  - дисперсія прискорень вертикальних коливань підресореної маси в центрі ваги;

$D_{\ddot{\theta}}$  - дисперсія прискорень кутових коливань у поздовжній площині;

$D_{\ddot{\psi}}$  - дисперсія прискорень кутових коливань у поперечній площині;

$D_{\ddot{z}_C \ddot{\theta}}$  - дисперсія прискорень взаємних поздовжньо-кутових коливань у поздовжній площині;

$a_E$  - відстань від центра ваги до точки  $E$  в поздовжньої площини;

$b_E$  - відстань від поздовжньої осі до точки  $E$  в поперечній площини.

Пошук дисперсії випадкового процесу на виході лінійної динамічної системи зв'язаний з обчисленням невластного інтеграла

$$D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 S_q(\omega) d\omega, \quad (8)$$

де  $|W(j\omega)|^2$  - квадрат модуля передатної функції системи;

$S_q(\omega)$  - спектральна щільність збурюючого впливу.

Спектральна щільність мікропрофіля як регулярного випадкового процесу апроксимована дрібно-раціональною функцією. Спектральна щільність дисперсії збурюючого впливу для самого загального випадку має вид



$$S_q(\omega) = D_0 v \frac{\omega^2 + \omega_1^2}{\omega^2(\omega^2 + \omega_2^2)}, \quad (9)$$

де  $\omega_1 = v\lambda_1$ ;  $\omega_2 = v\lambda_2$ ;  
 $\lambda_1, \lambda_2$  - дорожні частоти,  $m^{-1}$ ;  
 $v$  - швидкість руху.

Для відшукування дисперсій  $D_{\ddot{z}_c}, D_{\ddot{\theta}}, D_{\ddot{\psi}}$  скористаємося формулою

$$D_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_N(j\omega)}{H_N(j\omega)H_N(-j\omega)} d\omega = I_N, \quad (10)$$

Дисперсія прискорень взаємних коливань підресореної маси у вертикальній площині обчислюється по формулі

$$D_{\ddot{z}\ddot{\theta}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 2 \operatorname{Re} S_{\ddot{z}\ddot{\theta}}(\omega) d\omega, \quad (11)$$

де  $S_{\ddot{z}\ddot{\theta}}(j\omega) = W_{\ddot{z}}(-j\omega)W_{\ddot{\theta}}(j\omega) \cdot S_q(\omega)$ .

Параметрична оптимізація проведена методом покоординатного спуску. З метою прискорення ітераційного процесу пошуку мінімуму функції в дисертації розроблений метод визначення початкового наближення.

У результаті реалізації процесу параметричної оптимізації отримані дані, по яких приведені графіки оптимальних коефіцієнтів демпфірування  $\mu_{opt1}$  і  $\mu_{opt2}$  при проїзді по двох типах доріг з різними швидкостями.

Графіки наочно демонструють залежність оптимальних коефіцієнтів демпфірування від швидкості руху і типу дороги. Характер кривих для різних доріг істотно не відрізняється. Однак, чисельні значення помітно різні, особливо для великих швидкостей руху. Діапазон зміни  $\mu_{opt}$  досить великий, що висуває підвищені вимоги до виконавчого пристрою.

Для одержання порівнянних оцінок результату оптимізації розраховані значення коефіцієнтів загасання  $\psi$  для різних швидкостей руху і двох типів доріг: ґрунтовій й стерні озимої пшениці.

Отримані значення коефіцієнтів загасання істотно відрізняються від використовуваних при конструкторських розрахунках.

У третьому розділі проведено експериментальне дослідження автоматично керованого пневматичного амортизатора з магнітною рідиною (ПАР) з метою використання його як виконавчого пристрою автоматичної системи керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів.

Пневматичний амортизатор з магнітною рідиною забезпечує зміну сили опору на штоку в залежності від струму керування, що протікає по обмотці, розміщеної на штоку.

Дослідження динамічних властивостей ПАР проведено за допомогою експериментальної одномасової динамічної системи, у якості демпфіруючого елементу якої виступає ПАР. Динамічна система піддавалася кінематичному впливу на вібростенді.

Була висунута гіпотеза, що демпфіруюча сила ПАР підкоряється залежності

$$F_d = F_0 \operatorname{sign}(\dot{q}) + \mu \cdot \dot{q}, \quad (12)$$

де  $F_d$  - демпфіруюча сила;

$F_0$  - сила сухого тертя;

$\dot{q}$  - швидкість переміщення маси;

$\mu$  - коефіцієнт опору амортизатора, який враховує в'язке тертя.

З урахуванням (12) і за допомогою методу енергетичної лінеаризації отримано залежність

$$q_0 = B_0 \sqrt{\left( c^2 + \left( \frac{4F_0}{\pi\omega q_0} + \mu \right)^2 \omega^2 \right) / \left( (c - \omega^2 M)^2 + \left( \frac{4F_0}{\pi\omega q_0} + \mu \right)^2 \omega^2 \right)}, \quad (13)$$

яка пов'язує амплітуду коливань баластної маси  $M$  експериментальної одномасової системи з параметрами кінематичного впливу  $x(t) = B_0 \cos \omega t$ .

Задача параметричної ідентифікації ПАМ була вирішена за допомогою методу найменших квадратів.

Аналіз адекватності математичної моделі ПАМ, представленої у виді рівняння (13), експериментальним даним свідчить про гарний збіг теоретичних і експериментальних результатів, а отже, і про коректність висунутої гіпотези (12).

Аналіз регулювальної характеристики ПАМ показав, що залежність опору амортизатора від струму керування є лінійним. Таку властивість мають і інші параметри ПАМ. Лінійність регулювальних характеристик дозволяє достатньо просто реалізувати алгоритм автоматичного керування.

У четвертому розділі розроблена архітектура системи автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів, проведені дослідження, зв'язані з визначенням параметрів об'єкту керування та збурюючого впливу, а також наведені відомості про практичне використання результатів дисертаційних досліджень.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили сформулювати вимоги до архітектури системи автоматичного керування плавністю ходу, програмного забезпечення та апаратних засобів. Архітектура системи автоматичного керування плавністю ходу побудована як відкрита з можливістю її подальшого розширення. Апаратні засоби системи реалізовані на сучасній елементній базі з використанням магістрально-модульного принципу побудови системи з уніфікованих модулів. Вибір типів датчиків та їх кількості спирався на теоретичне обґрунтування і відповідає математичним моделям об'єкта керування та виконавчого пристрою.

Функціонування системи автоматичного керування здійснюється з допомогою розробленого алгоритму адаптивного керування підвіскою мобільних машин і агрегатів. Усі вимірювання, розрахунки та формування керуючих впливів відбуваються в реальному масштабі часу і дозволяють змінювати параметри підвіски в залежності від зміни дорожніх умов та швидкості руху.

Вихідними даними для процесу обчислень є масогабаритні та динамічні параметри об'єкту керування, а результатом виконання алгоритму – кодові послідовності, які за допомогою цифро-аналогових перетворювачів та підсилювачів потужності перетворюються у струм керування виконавчим пристроєм (ПАМ).

Програмне забезпечення розробленої системи функціонує в операційному середовищі Windows 98. Керування модулями введення-виведення здійснюється за допомогою DDL-драйверів фірми Advantech.

Імітаційне моделювання роботи автоматичної системи керування підвіскою мобільних машин і агрегатів показало зменшення дисперсії прискорень коливань підресореної маси в порівнянні з існуючою підвіскою на 9-35%, у залежності від виду дорожнього покриття. Отриманий результат свідчить про високу ефективність використання керованої підвіски.

В рамках співробітництва з ВАТ "ХТЗ", КП "ХКБМ ім. О.О. Морозова" та Науковим метрологічним центром (військових еталонів) проведений розрахунок розподілу середньоквадратичних значень прискорень коливань відносно центру мас трактора Т150К, чотирьохосних транспортних засобів спеціального призначення, а також розроблені рекомендації щодо параметричної ідентифікації динамічної системи при виконанні динамічних вимірювань характеристик коливань підвіски.

## ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати дозволили суттєво удосконалити математичні моделі і засоби автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні ними транспортно-технологічних операцій сільськогосподарського виробництва в різних польових і дорожніх умовах. Застосування цих моделей у системах автоматичного керування плавністю ходу дозволяє більш обґрунтовано розробляти архітектуру мікропроцесорних систем автоматичного демпфірування коливань та алгоритм адаптивного керування. Узагальнення основних наукових і практичних результатів дозволило зробити наступні висновки:

1. Досвід експлуатації мобільних машин і агрегатів при виконанні транспортно-технологічних операцій сільськогосподарського виробництва показав, що досягнення суттєвого поліпшення плавності ходу в умовах, коли опорна поверхня є невід'ємною складовою технологічного процесу, потребує використання автоматично керованої підвіски.

2. Розроблена математична модель коливань багатоосних мобільних машин і агрегатів на новому якісному рівні відбиває зв'язок між параметрами і станом динамічної системи, що дає змогу запропонувати більш адекватний алгоритм керування.

3. Проведена методом покоординатного спуску параметрична оптимізація об'єкту керування показала, що оптимальні параметри підвіски суттєво відрізняються (до 1.5 разів) від загальноновживаних і залежать від швидкості руху та параметрів збурюючого впливу.

4. Випробування автоматично керованого пневматичного амортизатора з магнітною рідиною (ПАР) в якості виконавчого пристрою системи автоматичного керування показали наявність у нього як пружних, так і демпфіруючих властивостей, які істотно залежать від струму, що дає можливість регулювати параметри об'єкту керування, змінюючи струм керування.

5. Розроблено математичну модель ПАР у виді аналітичної залежності амплітуди коливань від частоти кінематичного впливу. Проведені стендові іспити довели адекватність моделі реальному об'єкту і дозволили здійснити параметричну ідентифікацію ПАР.

6. Розроблена архітектура мікропроцесорної системи автоматичного керування дозволяє ефективно реалізувати алгоритм керування плавністю ходу.

7. Параметрична ідентифікація об'єкту керування за допомогою рівняння Вінера-Хопфа забезпечує визначення його динамічних параметрів.

8. Розроблений комплекс математичних моделей, методів та засобів реалізації системи автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів забезпечує зниження величини дисперсії прискорення підресореної маси на 9 - 35% в залежності від експлуатаційних умов. Достовірність отриманих результатів підтверджена імітаційним моделюванням.

9. Аналіз отриманих у дисертаційній роботі результатів дозволяє стверджувати, що вони можуть знайти застосування в області більш широкій, ніж та, що була обмежена метою, об'єктом і предметом даного дослідження. Математична модель багатоосних мобільних машин і агрегатів також може бути використаною при проектуванні і виготовленні спеціальних транспортних засобів, а ПАР, як універсальний виконавчий пристрій з регульованими жорсткістю і коефіцієнтом демпфірування, – у будь-якій електромеханічній системі, параметрами якої необхідно керувати у відповідності зі складним алгоритмом.

10. Розроблені математичні моделі коливань підвіски багатоосних мобільних машин і агрегатів, алгоритми і програми розрахунку характеристик підвіски використані при роз-

робці перспективних моделей мобільних машин і агрегатів і дослідженні їх експлуатаційних характеристик в ВАТ "ХТЗ", КП "ХКБМ ім. О.О. Морозова", Науковому метрологічному центрі (військових еталонів), м. Харків.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Рожков П.П., Рожкова С.Э., Юрченко А.Н. Разработка математической модели пневматического амортизатора с магнитной жидкостью // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХДАЗТ. - 2001. - № 2. – С.110-113.

Здобувачем побудовано математичну модель пневматичного амортизатора з магнітною рідиною у виді амплітудно-частотної характеристики.

2. Рожкова С.Э., Рожков П.П. Классификация состояний объектов протяженного типа // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХДАЗТ. - 1999. - № 5. – С.41-43.

Здобувачем запропоновано алгоритм визначення стану різних типів доріг у багатомірному параметричному просторі.

3. Фурман І.О., Рожков П.П., Рожков С.П. Параметрична ідентифікація динамічної системи підвіски транспортної машини за допомогою рівняння Вінера-Хопфа. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2002. - Вип.10. - С. 391-397.

Здобувачем запропоновано метод параметричної ідентифікації динамічної системи автоматично керованої підвіски мобільних машин і агрегатів і проведено імітаційне моделювання процесу керування.

4. Рожков П.П. К вопросу о моделировании колебаний N-осной динамической системы автотранспортного средства в поперечной плоскости // Проблемы создания новых машин и технологий. - Сб. науч. тр. Кременчугского гос. политехн. ун-та – Кременчуг: КГПУ, 2000. – Вып. 2/2000 (9). - С. 316-318.

5. Рожков П.П., Калмыков В.И., Бороденко Ю.Н., Рожков С.П. Регулировочные характеристики пневматического амортизатора с магнитной жидкостью. // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. – Харьков: ХГАДТУ, 2001. - Вып. 15-16. - С. 203-205.

Здобувачем на підставі експериментальних досліджень отримано регульовальні характеристики ПАМ, як виконавчого елементу автоматичної системи керування.

6. Рожков П.П., Рожков С.П. Задача параметрической идентификации подвески автомобиля // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Изд-во Харьк. ин-та пожарной безопасности МВД Украины, 1998. – Ч. 2. – С.39-41.

Здобувачем вирішено задачу параметричної ідентифікації підвіски мобільних машин і агрегатів при гармонійному збурюючому впливі.

7. Фурман І.О., Рожков П.П. Параметрична оптимізація підвіски n-осної транспортної машини // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2002. - Вип. 8. – С.70-73.

Здобувачем визначено оптимальні значення коефіцієнта демпфірування підвіски при різних швидкостях руху.

8. Рожков П.П., Рожкова С.Е. Математична модель коливань підвіски енергомодуля с.-г. призначення // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2003. - Вип.19, Т.2. – С. 136-140.

Здобувачем розроблено математичну модель коливань підвіски енергомодуля с.-г. призначення.

9. Рожков П.П., Рожкова С.Э., Алексеев В.О. Получение передаточной функции n-осной динамической системы автотранспортного средства // Автомобильный транспорт:

Проблемы и перспективы: Матер. IV-й междунар. науч.-техн. конференции. - Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. - С.163-168.

Здобувачем проведено теоретичні дослідження вертикальних коливань n-осної динамічної системи в позовжній площині.

10. Алексеев О.П., Рожков П.П., Рожкова С.Э. Алгоритмизация задач эргономического мониторинга транспортных коммуникаций: // Тр. Междунар. конф. “Эргономика на автомобильном транспорте”. – Харьков: Харьк. гос. авт.-дор. ун-т, 1997. - С. 72-74.

Здобувачем запропоновано алгоритм оцінки стану різних типів доріг.

## АНОТАЦІЇ

Рожков П.П. Модели та засоби автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів в агропромисловому комплексі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2004.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню задач розробки моделей та засобів автоматичного керування плавністю ходу мобільних машин і агрегатів при виконанні транспортно-технологічних операцій.

У дисертаційній роботі побудовано математичну модель коливань підресореної маси багатоосних мобільних машин і агрегатів як об’єктів автоматичного керування для різних типів опорної поверхні і різних швидкостей руху. Проведено параметричну оптимізацію підвіски за критерієм мінімуму дисперсії прискорення підресореної маси.

Для створення автоматично керованої підвіски мобільних машин і агрегатів як виконавчий пристрій запропонований електромеханічний пневматичний амортизатор з магнітною рідиною (ПАР). За результатами експериментальних досліджень побудована його математична модель і проведена параметрична ідентифікація. Отримано регульовальні характеристики ПАР.

Розроблено архітектуру та алгоритм роботи мікропроцесорної системи автоматичного керування плавністю ходу, засновані на математичній моделі з урахуванням особливостей функціонування виконавчого пристрою.

Ключові слова: транспортно-технологічні операції, система автоматичного керування, математична модель, параметрична ідентифікація, плавність ходу, підвіска мобільних машин і агрегатів, дисперсія прискорень коливань, пневматичний амортизатор з магнітною рідиною.

Рожков П.П. Модели и средства автоматического управления плавностью хода мобильных машин и агрегатов в агропромышленном комплексе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2004.

Диссертационная работа посвящена решению задач разработки моделей и средств повышения плавности хода мобильных машин и агрегатов при выполнении ними транспортно-технологических операций. Эффективность работы управляемой подвески определяется адекватностью математической модели колебаний и эффективностью исполнительных механизмов, реализующих алгоритм управления коэффициентом демпфирования.

В качестве критерия плавности хода мобильных машин и агрегатов выбран минимум дисперсии ускорения поддресоренной массы.

Разработана математическая модель колебаний многоосных мобильных машин и агрегатов в продольной и поперечной плоскостях в виде передаточных функций. В качестве источника возмущающего воздействия рассматривается микропрофиль опорной поверхности.

Математическая модель возмущающего воздействия представлена в виде спектральной плотности дисперсии неровностей. Получены аналитические зависимости, позволяющие вычислить дисперсию ускорения поддресоренной массы в любой точке кузова для различных типов опорной поверхности и различных скоростей движения. Проведена параметрическая оптимизация методом покоординатного спуска, позволившая определить вектор параметров подвески, обеспечивающий минимум критерия плавности хода. Для ускорения процесса оптимизации разработана методика выбора начального приближения.

Для реализации управляемой подвески мобильных машин и агрегатов предложен пневматический амортизатор с магнитной жидкостью (ПАМ). По результатам экспериментальных исследований разработана его математическая модель. Доказано, что ПАМ обладает как упругими, так и демпфирующими свойствами. Получены регулировочные характеристики, демонстрирующие близкую к линейной зависимость коэффициента демпфирования, жесткости и сухого трения от тока управления.

На основе полученной математической модели колебаний подвески, с учетом особенностей функционирования ПАМ, разработаны архитектура и алгоритм работы микропроцессорной системы управления подвеской мобильных машин и агрегатов. Решена задача идентификации возмущающего воздействия и параметрической идентификации подвески.

Ключевые слова: транспортно-технологические операции, система автоматического управления, математическая модель, параметрическая идентификация, плавность хода, подвеска мобильных машин и агрегатов, дисперсия ускорения колебаний, пневматический амортизатор с магнитной жидкостью.

Rozhkov P.P. Models and means of smooth travel automatic control of mobile machines and units in agriculture. - Manuscript.

The dissertation to receive a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.13.07 - Automation of technological processes. - National technical university "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2004.

The dissertation is devoted to the development of models and means of smooth travel automatic control of mobile machines and units when performing transport-technological operations. The mathematical model of fluctuations of cushioning mass of n-axis mobile machines and units as objects of automatic control for different types of a basic surface and different speeds of movement has been constructed. The parametrical optimization of a suspension bracket by criterion of a minimum of dispersion of cushioning mass acceleration has been carried out.

To create an automatically controlled suspension of mobile machines and units as an executive device the electromechanical pneumatic shock-absorber with a magnetic liquid (PAM) has been offered. By results of experimental researches a mathematical model has been developed and the parametrical identification has been carried out. The adjusting characteristics of PAM have been received.

Architecture and algorithm of microprocessor system of smooth travel automatic control has been carried out on mathematical model taking into account functionality of executive devices.

Key words: transport-technological operations, system of automatic control, mathematical model, parametrical identification, smooth travel, suspension of mobile machines and units, dispersion of acceleration of fluctuations, pneumatic shock-absorber with a magnetic liquid.

МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ПЛАВНІСТЮ ХОДУ МОБІЛЬНИХ МАШИН І АГРЕГАТІВ  
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

Відповідальний за випуск

к.т.н. Дьяков Є.Д.

Підп. до друк. 07.09.04 Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ .

Папір офісний. Друк на різнографі. 1,0 обл. – вид. арк. 1,0 умовн. – друк. арк.

Тираж 100 прим. Замовл. №

---

ХНАМГ, 61002, Харків, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії при ІОЦ ХНАМГ.  
61002, Харків, вул. Революції, 12.