



УДК 004.94:62-514.5

DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-22

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ РУЛЬОВИХ УПРАВЛІНЬ

Петров В. О., к.т.н.,

Бондар А. М., к.т.н.,

Чаусов С. В., к.т.н.,

Новік О. Ю., інженер

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

E-mail: andriy.bondar@tsatu.edu.ua

Тел.: +38(096)-936-28-77

**Анотація** – якість виконання сільськогосподарських операцій залежить від якості керування машинно-тракторним агрегатом (МТА). Проектування та випробування техніки потребує багато часу та матеріальних витрат. Тому пропонується спосіб моделювання поведінки МТА на різних швидкісних режимах та з різними геометричними параметрами укомплектованих МТА. В статті розглянуте питання моделювання «людино-машинної» системи. Також зазначено, що людина не являє собою ідеальний регулятор, тому що із збільшенням робочої швидкості МТА кількість помилок також зростає. На процес накопичення помилок впливає не лише швидкість руху, але і зовнішні фактори (пора доби, рельєф поля, погодні умови та ін.). Зворотна реакція оператора на зовнішні збуджуючі чинники може сягати до 2.5с., а це в свою чергу значно погіршує якість роботи. Тому актуальним є дослідження рульових керувань, які можуть працювати на підвищених швидкісних режимах і можуть забезпечити більш точне відстеження заданої траєкторії руху МТА. Теоретичний аналіз і експериментальні дослідження процесів, що відбуваються під час керування машинно-тракторним агрегатом показали, що зовнішні збуджуючі впливи підпорядковуються нормальному закону розподілення. Розроблена кінематична схема руху МТА вздовж базової лінії на прикладі двоточкової «велосипедної» моделі. В статті наведені перспективні моделі рульових керувань. Особлива увага приділена адаптивному рульовому керуванню, яке має змогу змінювати передаточне відношення рульового механізму в залежності від швидкості руху МТА. Запропонована методика проведення інтерактивного експерименту та визначені оціночні критерії керованості моделі з різними типами та конструкціями рульових керувань. Наведені попередні результати дослідження керованості моделі МТА в режимі прямолінійного руху.

**Ключові слова** – рульове керування, машинно-тракторний агрегат, оператор МТА, швидкість руху, якість виконання операції, точність відслідковування траєкторії.

*Постановка проблеми.* Відомо, що натурні дослідження керованості мобільних машин є дуже дорогими та тривалими. В



останній час розробка складних систем не може бути виконана без застосування моделювання процесів в інтерактивному режимі. Особливо це стосується «людино-машинної» системи. Метою моделювання є дослідження взаємозв'язку між керованістю мобільної машини з одного боку, умовами його руху, конструкцією і параметрами його рульового управління – з іншого. Виходячи з визначення керованості, моделюванню підлягає «людино-машина» система, що пов'язана зі складністю фізичних, психологічних та інформаційних процесів. Найбільш складною та важливою за своїм призначенням ланкою «людино-машинної» системи, що досліджується, є оператор.

*Методика.* Відомі намагання математичного [4] описання поведінки людини, однак це пов'язано з не виправданими спрощеннями можливостей людини. Відомо, що в сучасній, складній техніці використовуються комп'ютерні моделюючі комплекси та тренажери. З одного боку вони використовуються для тренування моторних навичок оператора, з іншого боку – широко використовуються для отримання оптимальних експлуатаційних показників систем керування та загальною оцінкою можливостей нових типів систем керування [1].

Такий підхід дозволяє отримати достовірні оцінки керованості складних систем управління, синтезувати таку систему керування, яка відповідає можливостям людини оператора та забезпечує високі показники керованості. І на останок можливо дослідити нетрадиційні рульові керування без виготовлення їх складних конструктивних моделей.

Апаратне забезпечення процесу моделювання – мінімізоване, потрібні тільки рульове колесо, аналогово-цифровий перетворювач, через який керуючі впливи оператор передає до комп'ютера. Збурюючі впливи носять випадковий характер та генеруються самим комп'ютером на попередньому етапі випробувань.

Дослідження на комп'ютерному тренажері складається з кількох етапів:

- ✓ визначення типу рульового керування його параметрів та параметрів режиму руху моделі;
- ✓ проведення експериментального заїзду в умовах інтерактивного обміну інформації між комп'ютером і оператором, при цьому фіксуються динаміка зміни керуючих впливів та показників якості керування;
- ✓ обробка результатів інтерактивного експерименту математичними методами – дисперсійний та спектральний аналіз та отримання кількісних показників керованості (добротності та часу реагування оператора).

*Результати і обговорення.* Комп'ютерний тренажер був розроблений на базі комп'ютера класу Pentium 4, на алгоритмічному мові Delphi 6. Розроблене програмне забезпечення дає можливість безперервно проводити всі три етапи дослідження. Один цикл дослідження займає не більш 10 хвилин. На рис.1 наведений загальний вид тренажеру під час виконання пробного віртуального «заїзду».



Рис.1. Загальний вид тренажера.

На моніторі відображається поточне положення мобільної машини відносно дороги. Керуючі впливи оператор передає за допомогою реального рульового колеса, яке кінематичне пов'язане з мишкою комп'ютера.

Робота програми починається з налаштування тренажера (рис. 2):

- ✓ визначається тип моделі рульового керування;
- ✓ параметри машини та режими руху;
- ✓ встановлюється співвідношення між реальним та віртуальним кермом, шляхом визначення чутливості миші;
- ✓ встановлюється наявність збурюючих впливів;
- ✓ формування та фіксація файлів експериментальних даних.

Під час виконання пробного «віртуального» заїзду (рис. 3) при натисканні на кнопку F1 починається рух віртуальної моделі. Починається плавний розгін машини до заданої швидкості, 2-х секундна пауза для стабілізації керування, 30-ти секундна фаза фіксації визначаючих параметрів.

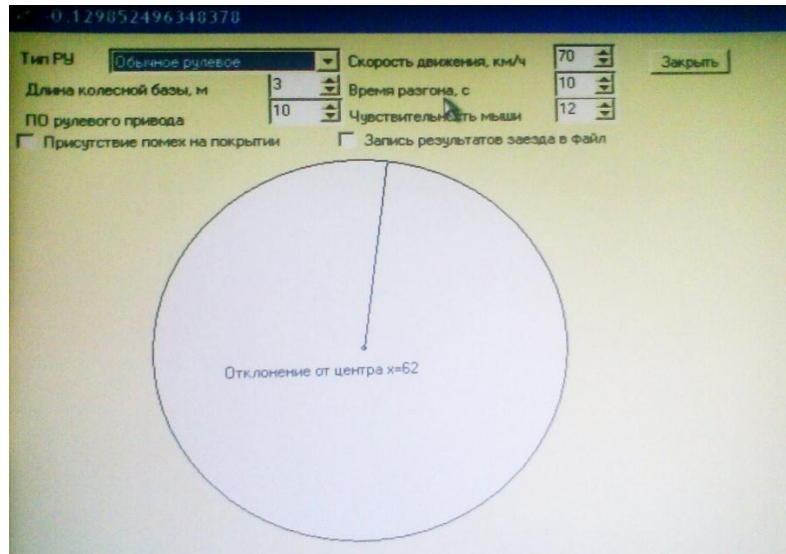


Рис. 2. Меню налаштування автотренажера.

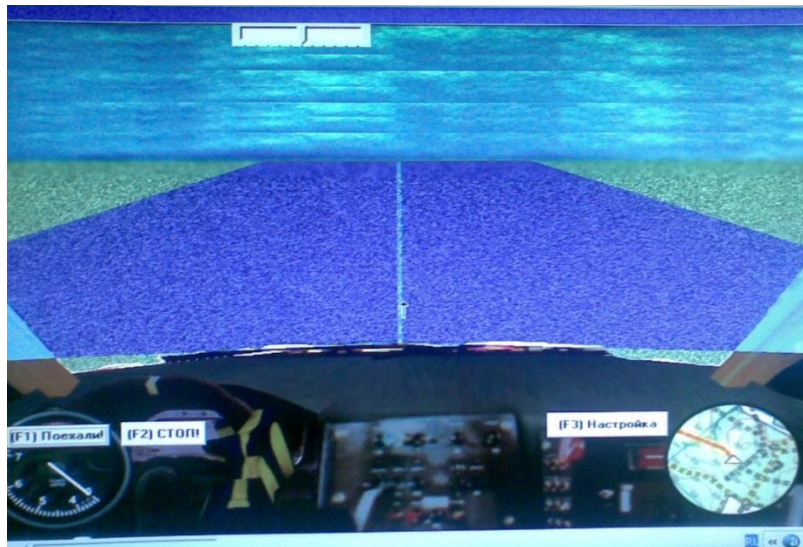


Рис.3. Візуальне відображення дороги в перспективі на моніторі під час активної фази експерименту.

Оператор отримує візуальну інформацію про положення машини на дорозі безпосередньо з монітору, яка поновлюється 20 разів за секунду. Це дає уявлення непереривного руху по дорозі, яка відображена на моніторі в перспективі. Вид картинки постійно поновлюється залежно від віртуальних параметрів значень курсового кута моделі та її зміщення відносно базової лінії. Кожне наступне положення моделі розраховується виходячи з попереднього, з урахуванням керуючих і збурюючих впливів.

В процесі керування оператор намагається утримати модель машини вздовж базової лінії. Таким чином, аналізуючи динаміку процесу керування та його точність, є можливість отримати достовірні



оцінки керованості даної моделі. Для цього використовуються стандартні математичні пакети дисперсійного і спектрального аналізу.

На рис. 3 відображена візуальна інформація о положенні машини на дорозі в перспективі.

Обробка отриманої інформації, яка проводиться безпосередньо по закінченню експерименту на комп'ютері, дозволяє оперативно оцінювати керованість тієї чи іншої моделі МТА. Правомірність такого підходу полягає в наступному:

✓ крізь зоровий канал оператор отримує біля 90% інформації відносно зовнішньої обстановки;

✓ час реакції тракториста на відхилення процесу, що контролюється, в полі складає 0.5 секунди, що більш ніж у два рази перевищує шаг квантування по часу при моделюванні.

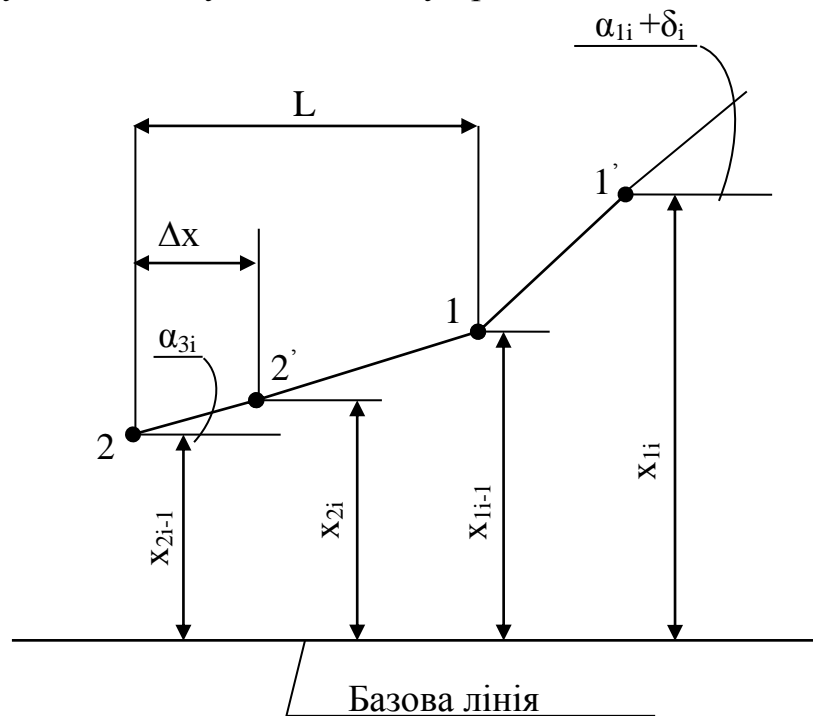


Рис. 4. Схема перетворювання координат для розрахунку параметрів дискретних моделей

Невелике значення кутів  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  і  $\delta$  дозволило уникнути застосування тригонометричних формул та визначило простоту математичних моделей, конкретний вид яких залежить від принципу дії особливостей рульових керувань модельованих МТА.

$V$  – швидкість руху МТА;

$L$  – довжина колісної бази трактора;

$W$  – передатне відношення рульового механізму;

$\alpha$  – кут повороту рульового колеса (керуючий вплив з мишки);

$\alpha_1$  – кут повороту передніх керуючих коліс;

$\alpha_3$  – поточне значення курсового кута;



$\Delta t$  – шаг квантування по часу (0.05 с);  
 $x_1, x_2$  – поточне значення відхилень від базової лінії переднього та заднього коліс трактора відповідно;  
 $\Delta x$  – шаг квантування моделі по переміщенню;  
 $\delta$  – значення збурюючого кута уводу еластичних шин.

Розглянемо деякі рульові керування:

### 1. Традиційне рульове керування.

Базовий варіант – рульове керування трактора з передніми управляючими колесами і з постійним передатним відношенням рульового приводу.

Дискретна математична модель в даному випадку має вигляд:

$$\begin{cases} \alpha 1_i = \frac{\alpha_i}{W}; \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ \alpha 3_i = \frac{(x1_{i-1} - x2)}{L}; \\ x1_i = x1_{i-1} + (\alpha 3_i + \alpha 1_i + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ x2 = x2 + \alpha 3_i \cdot \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

### 2. Рульове керування постійної чутливості:

Конструкція такого рульового керування відображена у роботах [1, 2, 6] і забезпечує сумісність високої маневреності і стабільності руху МТА на підвищених швидкостях.

$$\begin{cases} \Delta x = V_i \cdot \Delta t; W_i = W \left( 1 + \frac{V_i}{V_0} \right); \\ \alpha 1_i = \alpha_i / W_i; \\ \alpha 3_i = (x1_{i-1} - x) / L; \\ x1_i = x1_{i-1} + (\alpha 3_i + \alpha 1_i + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ x2 = x2 + \alpha 3_i \cdot \Delta x \end{cases} \quad (2)$$

### 3. Рульове керування по положенню:

Переваги такого способу керування та можливі способи втілення у конструкцію МТА наведені у роботі [3].

$$\begin{cases} \alpha 1_i = \frac{\alpha_i}{W}; \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ \alpha 3_i = \frac{(x1_{i-1} - x2)}{L}; \\ x1_i = x1_{i-1} + (\alpha 1_i + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ x2 = x2 + \alpha 3_i \cdot \Delta x \end{cases} \quad (3)$$

В результаті проведення експерименту були отримані дані, які обробляються та виводяться комп'ютерною програмою у наступному вигляді: рис. 5 та 6.

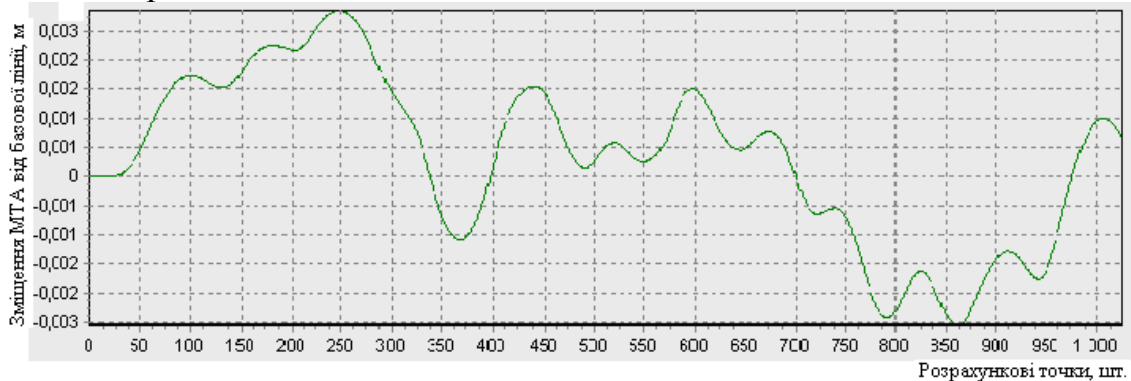


Рис.5. Траєкторія руху МТА

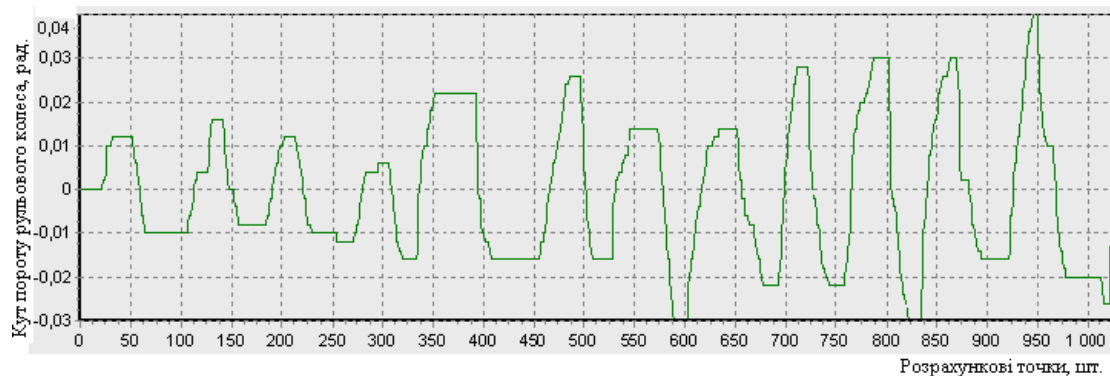


Рис.6. Динаміка зміни кутів повороту керма МТА

Також, окрім графіків можливо отримати статистичні характеристики руху МТА у повздовжній площині за допомогою вбудованих у програму обчислюваних пакетів.

*Висновки.* Запропонована методика інтерактивного моделювання процесу керування МТА на комп'ютерному тренажері дає можливість при мінімальному апаратному забезпеченні отримати адекватні оцінки керованості.

Попередні оцінки моделей нетрадиційних рульових керувань виявили значні переваги ергономічних показників керованості: добротність, стабільність відслідковування завданої траєкторії та зручність керування на всіх режимах руху МТА.

### *Література*

1. Бондар А. М. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі / А. М. Бондар, В. О. Петров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА. – Мелітополь, 2006. – Вип. 43. – С.98-103.
2. Патент 24161 Україна, МПК В62D1/18. Рульова колонка транспортного засобу / В. О. Петров, А. М. Бондар, ТДАТУ. –



u200700056; заявл. 02.01.07; опубл. 25.06.07, Бюл. № 9.

3. Петров В. О. Синтез ергономічних рульових управлінь для мобільних машин / В. О. Петров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА. – Мелітополь, 2000. – Вип. 1, т. 17. – С. 60-64.

4. Лубяний М. М. Аналіз функціонування системи "водій-рульове керування" МТА / М. М. Лубяний // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА. – Мелітополь, 2000. – Вип. 1, т. 17. – С. 21-27.

5. Петров В. О. Рульове управління колісного шасі яке реалізує керування напрямком руху по положенню / В. О. Петров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА. – Мелітополь, 2001. – Вип. 1, т. 24. – С. 83-86.

6. АС 48695 Україна. Симулятор руху машинно-тракторного агрегату (МТА): комп'ютерна програма / А. М. Бондар, А. В. Петров; ТДАТУ. – К. : Державна служба інтел. власності України, 2013.

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РУЛЕВЫХ УПРАВЛЕНИЙ**

Петров В. А., Бондарь А. Н., Чаусов С. В.,  
Новик А. Ю.

### **Аннотация**

Качество выполнения сельскохозяйственных операций зависит от качества управления машинно-тракторным агрегатом (МТА). Проектирование и испытания техники требует много времени и материальных затрат. Поэтому предлагается способ моделирования поведения МТА на различных скоростных режимах и с различными геометрическими параметрами укомплектованных МТА. В статье рассмотрен вопрос моделирования «человеко-машинной» системы. Также указано, что человек не представляет собой идеальный регулятор, так как с увеличением рабочей скорости МТА количество ошибок также растет. На процесс накопления ошибок влияет не только скорость движения, но и внешние факторы (время суток, рельеф поля, погодные условия и др.). Обратная реакция оператора на внешние возмущающие воздействия может достигать 2.5с., а это в свою очередь значительно ухудшает качество работы. Поэтому актуальным является исследование рулевых управлений, которые могут работать на повышенных скоростных режимах и могут обеспечить более точное отслеживание задачей траектории движения МТА. Теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов, происходящих во время управления машинно-тракторным агрегатом, показали, что внешние возмущающие воздействия подчиняются нормальному закону распределения. Разработана кинематическая схема движения МТА вдоль базовой линии на примере двухточечной «велосипедной» модели. В статье приведены перспективные модели рулевых управлений. Особое внимание уделено адаптивному рулевому управлению, которое имеет возможность изменять передаточное отношение рулевого механизма в зависимости от скорости движения МТА. Предложена





методика проведения интерактивного эксперимента и определены оценочные критерии управляемости модели с различными типами и конструкциями рулевых управлений. Приведены предварительные результаты исследования управляемости модели МТА в режиме прямолинейного движения.

## COMPUTER MODELING OF THE CONTROL PROCESS OF VARIOUS TYPES OF STEERING CONTROLS

V. Petrov, A. Bondar, S. Chausov, A. Novik

### Summary

The quality of agricultural operations depends on the quality of management of the machine-tractor unit (MTA). Designing and testing of equipment requires a lot of time and material costs. Therefore, a method for simulating the behavior of MTAs at various speed modes and with various geometric parameters of completed MTAs is proposed. The article considers the question of modeling the "human-machine" system. It is also indicated that the person does not represent an ideal regulator, since the number of errors increases with the increase in the operating speed of the MTA. The process of accumulation of errors affects not only the speed of movement but also external factors (time of day, field relief, weather conditions, etc.). The inverse reaction of the operator to external disturbing factors can reach 2.5 s. And this in turn significantly worsens the quality of work. Therefore, it is urgent to investigate steering controls that can operate at higher speeds and can provide a more accurate tracking of the task of the MTA's trajectory. Theoretical analysis and experimental studies of processes occurring during the control of the machine-tractor unit showed that external disturbing influences obey the normal distribution law. A kinematic scheme of the motion of the MTA along the baseline was developed using the example of a two-point "bicycle" model. The article presents perspective models of steering controls. Particular attention is paid to adaptive steering, which has the ability to vary the steering gear ratio depending on the speed of the MTA. The proposed technique for carrying out the interactive experiment and the estimated criteria for the controllability of the model with different types and designs of steering controls. The preliminary results of the study of the controllability of the MTA model in the regime of rectilinear motion are given.

*Keywords:* steering, machine-tractor unit, operator, speed, operation quality, precision tracking trajectory.