

## МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, РОБОЧІ ОРГАНИ ТА МАШИНИ ДЛЯ РОСЛИННИЦТВА

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-1>  
УДК 631.171; 631.372

### Дослідження автоматичного водіння мобільного мостового агрозасобу по слідах постійної технологічної колії

**Адамчук В. В.,**

д.т.н., академік НААН, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»;

ORCID iD 0000-0003-0358-7946

**Булгаков В. М.,**

д.т.н., академік НААН, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

ORCID iD 0000-0003-3445-3721

**Кувачов В. П.,**

к.т.н., Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного;

ORCID iD 0000-0002-5762-256X

**Головач І. В.,**

д.т.н., Національний університет біоресурсів і природокористування України,

e-mail: holovach.iv@gmail.com; ORCID iD 0000-0003-1387-4789

**Ігнат'єв Є. І.,**

к.т.н., Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного;

ORCID iD 0000-0003-0315-1595

#### Анотація

**Мета.** Визначення закономірностей впливу параметрів мостового агрозасобу і системи його автоматичного водіння по слідах постійної технологічної колії на кінематику його бортового (силового) повороту та розробка основних шляхів розвитку теорії автоматичного водіння спеціалізованих мостових агрозасобів.

**Методи.** Теоретичні дослідження, синтез конструктивних схем і параметрів мостового агрозасобу здійснювалися за допомогою моделювання на ПК умов його функціонування. В основу методів дослідження покладено основи теорії трактора й теоретичної механіки з використанням пакета MathCad. Експериментальні випробування мостового агрозасобу і реалізація запропонованого способу його автоматичного водіння по слідах постійної технологічної колії з використанням лазерного променя було проведено в спеціально обладнаній лабораторії.

**Результати.** Для теоретичного дослідження процесу автоматичного водіння мостового агрозасобу розглянуто можливі умови реалізації ним бортового (силового) повороту. Побудована еквівалентна схема сил та кінематики бортового повороту, на підставі якої отримані аналітичні вирази, що зв'язують між собою конструктивні, кінематичні та силові параметри мостового агрозасобу, за яких можливе ефективне здійснення ним бортового повороту. Також встановлено, що перспективним і ефективним для автоматизації водіння мостового агрозасобу по

слідах постійної технологічної колії з чисто бортовим (силовим) способом його повороту є використання лазерного променя як задавача траєкторії. Водночас отримана аналітична залежність для визначення точності розташування лазерного випромінювача з лівого та правого крайків постійної технологічної колії залежно від заданої точності подачі лазерного променя.

#### Висновки

1. Автоматизація водіння мостового агрозасобу з бортовим (силовим) способом його повороту по слідах постійної технологічної колії вимагає значно меншої різниці моментів, підведених до коліс правого та лівого його бортів, порівнюючи з традиційним трактором. Ця різниця пропорційна ширині колії агрозасобу за відносно меншої величини його колісної бази.

2. Отримання найменших енергетичних витрат на виконання бортового (силового) повороту мостового агрозасобу можна досягти за рівних за абсолютною величиною, але протилежно напрямлених бічних деформацій шин коліс його лівого та правого бортів. Для цього бортовий (силовий) поворот агрозасобу слід здійснювати так, щоб миттєвий центр його повороту знаходився на осі поперечної симетрії його шасі.

3. Точність положення лазерного випромінювача за умови автоматизації водіння мостового агрозасобу за довжини гонів 1000 м повинна знаходитися на рівні 0,0014 град. Досягти такої точності можна, якщо використовувати спеціальні лазерні

випромінювачі, яким властива висока точність, або додатково обладнати агрозасоби системою «ближньої» навігації, що здатна фіксувати положення орієнтирів, пов'язаних із технологічною колією.

4. У разі курсових відхилень мостового агрозасобу в процесі свого руху в межах 5 град. і швидкості  $2,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  величина затримки сигналу автоматизованою системою керування повинна бути не більшою за 0,11 с. Зі зменшенням швидкості руху мостового агрозасобу величина затримки зазначеного сигналу експоненціально збільшується, що знижує вимоги до роботи такої системи. Зі збільшенням амплітуди курсових відхилень мостового агрозасобу до 12 град. величина затримки сигналу автоматизованою системою керування

дещо зменшується (на 16%). Тому покращення стійкості руху мостових агрозасобів дозволить підвищити якість їх автоматичного водіння з бортовим поворотом по слідах постійної технологічної колії.

5. Загалом агрегативання мостового агрозасобу, його ручне та автоматичне керування, а також виконання ним силового (бортового) способу повороту не створюють будь-яких проблем як для оператора, так і для автоматизації цих процесів.

**Ключові слова:** колійна та мостова системи землеробства, мостовий агрозасіб, автоматизація водіння, локальні системи позиціонування, теоретичні та експериментальні дослідження, точність.

UDC 631.171; 631.372

### Investigation of automatic driving of a mobile wide span agricultural vehicle in the wake of a constant technology track

**Adamchuk V. V.,**

Ph.D., Academician of NAAS, National Scientific Center "Institute of Agricultural Engineering and Electrification"; ORCID iD 0000-0003-0358-7946

**Bulgakov V. M.,**

Ph.D., Academician of NAAS, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; ORCID iD 0000-0003-3445-3721

**Kuvachov V. P.,**

Ph.D., Dmytro Motomyi Tavria State Agrotechnological University; ORCID iD 0000-0002-5762-256X

**Holovach I. V.,**

Ph.D., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, e-mail: holovach.iv@gmail.com; ORCID iD 0000-0003-1387-4789

**Ihnatiev Ye. I.,**

Ph.D., Dmytro Motomyi Tavria State Agrotechnological University; ORCID iD 0000-0003-0315-1595

#### Annotation

**Purpose.** Determination of regularities of influence of parameters of bridge agricultural means and system of its automatic driving in the wake of a constant technological track on kinematics of its onboard (force) turn and development of the basic ways of development of automatic driving theory of specialized wide span agricultural means.

**Methods.** Theoretical researches, synthesis of constructive schemes and parameters of the bridge agricultural means were carried out by modeling on the personal computer of conditions of its functioning. Bases of the theory of a tractor and theoretical mechanics with use of a Mathcad package are the basis for methods of research. Pilot studies of wide span agricultural means and implementation of the offered way of its automatic driving in the wake of a constant technology track with use of a laser beam were carried out in specially equipped laboratory.

**Results.** For theoretical research of process of automatic driving of wide span agricultural means

possible conditions of implementation of onboard (power) turn by it are considered. The equivalent scheme of forces and kinematics of onboard turn is constructed, on the basis of which the received analytical expressions which connect among themselves design, kinematic and power data of wide span agricultural means, at which perhaps effective implementation of onboard turn. It is also established that perspective and effective for automation of driving of wide span agricultural means in the wake of a constant technology track with purely onboard (power) method of its turn is uses of a laser beam as trajectory sensor. Thus the received analytical dependence for determination of accuracy of an arrangement of a laser emitter from the left and right side of a constant technology track depending on the set accuracy of giving of a laser beam.

#### Conclusions

1. Automation of driving of wide span agricultural means with an onboard (power) way of its turn in the wake of a constant technology track demands considerably a smaller difference of

the moments brought to wheels of the right and left its boards in comparison with a traditional tractor. This difference is proportional to agricultural means track width at rather smaller size of its wheel base.

2. Receiving the smallest power costs of performance of onboard (power) turn of bridge agricultural means can be reached at equal on absolute value, but opposite directed lateral deformations of wheels tires of its left and right boards. For this purpose onboard (power) turn of agricultural means should be carried out so that the instant center of its turn was on an axis of cross symmetry of its chassis.

3. Accuracy of provision of a laser emitter at automation of driving of wide span agricultural means with a length of rutting of 1000 m has to be at the level of 0.0014 deg. It is possible to reach such accuracy if to use special laser emitters in which high precision is inherent or in addition to equip agricultural means with system of «near» navigation which is capable to fix the provision of the reference points connected with a technology track.

4. At course deviations of wide span agricultural means in the process of movement within

5 deg. and speeds of  $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  signal delays value an automated control system has to be not bigger than 0.11 s. With reduction of movement speed of wide span agricultural means the value of a delay of the specified signal exponential increases that reduces requirements to work of such system. At increase in amplitude of course deviations of wide span agricultural means to 12 deg. signal delay value an automated control system decreases a little (by 16%). Therefore improvement of stability of the movement of wide span agricultural means will allow to increase quality of their automatic driving with onboard turn in the wake of a constant technology track.

5. In general, the aggregation of wide span agricultural vehicle, its manual and automatic control, as well as its implementation of the power (on-board) method of turning does not create any problems for operator and automation of these processes.

**Keywords:** track and bridge systems of agriculture, wide span agricultural means, driving automation, local positioning systems, theoretical and experimental researches, accuracy.

УДК 631.171; 631.372

### Исследование автоматического вождения мобильного мостового агросредства по следам постоянной технологической колеи

**Адамчук В. В.,**

д.т.н., академик НААН, Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»;

ORCID iD 0000-0003-0358-7946

**Булгаков В. М.,**

д.т.н., академик НААН, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины; ORCID iD 0000-0003-3445-3721

**Кувачов В. П.,**

к.т.н., Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного; ORCID iD 0000-0002-5762-256X

**Головач І. В.,**

д.т.н., Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

e-mail: holovach.iv@gmail.com; ORCID iD 0000-0003-1387-4789

**Игнатьев Е. И.,**

к.т.н., Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного; ORCID iD 0000-0003-0315-1595

#### Аннотация

**Цель.** Определение закономерностей влияния параметров мостового агросредства и системы его автоматического вождения по следам постоянной технологической колеи на кинематику его бортового (силового) поворота и разработка основных путей развития теории автоматического вождения специализированных мостовых агросредств.

**Методы.** Теоретические исследования, синтез конструктивных схем и параметров мостового агросредства осуществлялись путем моделиро-

вания на ПК условий его функционирования. В основу методов исследования положены основы теории трактора и теоретической механики с использованием пакета MathCad. Экспериментальные исследования мостового агросредства и реализация предложенного способа его автоматического вождения по следам постоянной технологической колеи с использованием лазерного луча были проведены в специально оборудованной лаборатории.

**Результаты.** Для теоретического исследования процесса автоматического вождения мосто-

вого агросредства рассмотрены возможные условия реализации им бортового (силового) поворота. Построена эквивалентная схема сил и кинематики бортового поворота, на основании которой получены аналитические выражения, которые связывают между собой конструктивные, кинематические и силовые параметры мостового агросредства, при которых возможно эффективное осуществление им бортового поворота. Также установлено, что перспективным и эффективным для автоматизации вождения мостового агросредства по следам постоянной технологической колеи с чисто бортовым (силовым) способом его поворота является использование лазерного луча как датчика траектории. При этом получена аналитическая зависимость для определения точности расположения лазерного излучателя с левой и правой сторон постоянной технологической колеи в зависимости от заданной точности подачи лазерного луча.

#### Выводы

1. Автоматизация вождения мостового агросредства с бортовым (силовым) способом его поворота по следам постоянной технологической колеи требует значительно меньшей разности моментов, подведенных к колесам правого и левого его бортов, по сравнению с традиционным трактором. Эта разность пропорциональна ширине колеи агросредства при относительно меньшей величине его колесной базы.

2. Получение наименьших энергетических затрат на выполнение бортового (силового) поворота мостового агросредства можно достичь при равных по абсолютной величине, но противоположно направленных боковых деформациях шин колес его левой и правой бортов. Для этого бортовой (силовой) поворот агросредства следует осуществлять таким образом, чтобы мгновенный центр его поворота находился на оси поперечной симметрии его шасси.

3. Точность положения лазерного излучателя при автоматизации вождения мостового агросредства при длине гона 1000 м должна находиться на уровне 0,0014 град. Достичь такой точности можно, если использовать специальные лазерные излучатели, которым присуща высокая точность, или дополнительно оборудовать агросредства системой «ближней» навигации, которая способна фиксировать положение ориентиров, связанных с технологической колеей.

4. При курсовых отклонениях мостового агросредства в процессе своего движения в пределах 5 рад. и скорости  $2,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  величина задержки сигнала автоматизированной системой управления должна быть не больше чем 0,11 с. С уменьшением скорости движения мостового агросредства величина задержки указанного сигнала экспоненциально увеличивается, что снижает требования к работе такой системы. При увеличении амплитуды курсовых отклонений мостового

агросредства до 12 град. величина задержки сигнала автоматизированной системой управления несколько уменьшается (на 16%). Поэтому улучшение устойчивости движения мостовых агросредств позволит повысить качество их автоматического вождения с бортовым поворотом по следам постоянной технологической колеи.

5. В целом же агрегатирование мостового агросредства, его ручное и автоматическое управление, а также выполнение им силового (бортового) способа поворота не создают никаких проблем как для оператора, так и для автоматизации этих процессов.

**Ключевые слова:** колеевая и мостовая системы земледелия, мостовое агросредство, автоматизация вождения, локальные системы позиционирования, теоретические и экспериментальные исследования, точность.

**Постановка проблеми.** Подальший високоефективний розвиток сільськогосподарського виробництва України можливий за умови широкого впровадження мостових агросредств, які функціонують за принципами колійної та мостової систем землеробства. Враховуючи перспективи подальшої автоматизації всіх технологічних процесів у цих системах, з'являються специфічні вимоги до мостових агросредств як об'єктів автоматизації. При цьому низька ефективність серійної GPS-апаратури, що використовується в системах паралельного водіння традиційних тракторів, не дозволяє її застосовувати для автоматизації водіння мостових агросредств, які рухаються по слідах постійної технологічної колії. У такій ситуації виникає необхідність пошуку ефективних локальних систем позиціонування, практичний досвід використання яких у таких системах вивчений недостатньо. Зважаючи на необхідність автоматизації мостових агросредств, слід обґрунтувати концептуальні рішення відносно їхніх окремих складових: вибори навігаційної системи, ходової системи, органів керування, силової установки. Від вдалого вибору конструктивних схем та параметрів цих елементів залежить успіх подальшої автоматизації мостових агросредств, які рухаються по слідах постійної технологічної колії.

Останнім часом у світі проводяться ґрунтовні дослідження щодо впровадження систем автоматичного (паралельного) водіння мобільних енергетичних і транспортних засобів [1–3]. Традиційно системою автоматичного керування називають замкнуту динамічну систему, в якій вимірюється різниця

між заданим і поточним значеннями відповідно прийнятого вимірювального параметра. І, залежно від результату його вимірювання, здійснюється автоматична дія, спрямована на зменшення зазначеної різниці до допустимо малої величини [4]. Такі автоматизовані системи паралельного водіння мобільних енергетичних або транспортних засобів можуть працювати за різними принципами дії. Зокрема, за допомогою супутникової навігації GPS, радарів дальньої та ближньої дій, лазерів видимого спектра та інфрачервоного випромінювання, відеокамер, які відслідковують панораму переднього огляду з подальшим аналізом зображень, та інше [5–7].

Відомо, що завдання автоматизації водіння мобільних машин зводиться до задачі створення комплексу пристроїв, які можуть виконувати описані вище дії без участі оператора. Стосовно до мостових агрозасобів, які рухаються по слідах постійної технологічної колії, це завдання виявляється доволі складним. Насамперед через малі можливості їх маневрування в процесі руху та дії великої кількості випадкових збурювальних факторів, що створюють їм низку можливих ситуацій, на які слід реагувати дією на взаємопов'язані органи керування (рульове управління, гальма, управління двигуном та ін.). Але, на думку авторів, ефективним за автоматичного керування мостовими агрозасобами в межах слідів постійної технологічної колії може бути спосіб силового (бортового) їх повороту. Цей спосіб, як відомо, реалізується обертанням коліс різних сторін машини з різною швидкістю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для автоматичного водіння мобільних сільськогосподарських агрегатів великою популярністю користуються системи на основі GPS-апаратури [8]. Технічна досконалість сучасної апаратури щодо точності відтворення заданих траєкторій мобільних машин вражає досягнутими результатами [9–11]. Але для реалізації повністю автоматизованого водіння мостових агрозасобів у межах ширини постійної технологічної колії точність GPS-апаратури виявляється недостатньою. Декларовані виробниками GPS-апаратури параметри їхньої точності є достовірними, але в умовах практичного застосування дають недопустиме відхилення фактичної траєкторії руху мобільних машин від заданої. Спроби доповнити системи GPS-навігації додатковими корегувальними системами ближньої навігації суттєво усклад-

нюють апаратуру, знижують її надійність і підвищують вартість [12, 13]. У такій ситуації інтерес представляє можливість автоматичного керування рухом мостових агрозасобів по заздалегідь заданій траєкторії слідів постійної технологічної колії з використанням локальних систем позиціонування.

**Мета досліджень.** Визначення закономірностей впливу параметрів мостового агрозасобу і системи його автоматичного водіння по слідах постійної технологічної колії на кінематику його бортового (силового) повороту та розробка основних шляхів розвитку теорії автоматичного водіння спеціалізованих мостових агрозасобів.

**Методи досліджень.** Теоретичні дослідження, синтез конструктивних схем і параметрів мостового агрозасобу здійснювався за допомогою моделювання на ПК умов його функціонування. В основу методів дослідження покладено основи теорії трактора й теоретичної механіки з використанням пакета MathCad.

Експериментальні випробування мостового агрозасобу і реалізація запропонованого способу його автоматичного водіння по слідах постійної технологічної колії з використанням лазерного променя було проведено в спеціально обладнаній лабораторії. Фізичним об'єктом досліджень був мостовий агрозасіб розробленої нами конструкції, який було експериментально досліджено в ґрунтовому каналі [14] (рис. 1). На ньому з обох боків розміщені електричні двигуни 1 і 2, які приводять у дію відповідно колеса його правого та лівого бортів, що рухаються по слідах постійної технологічної колії 3.

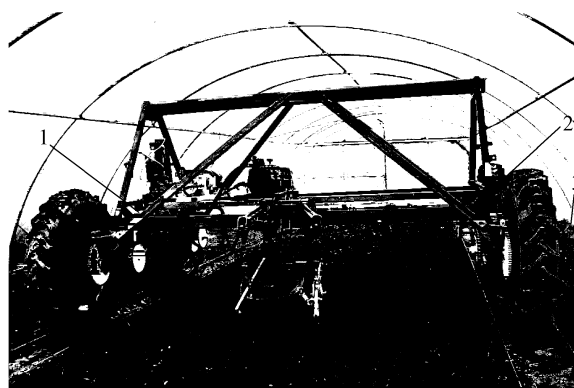


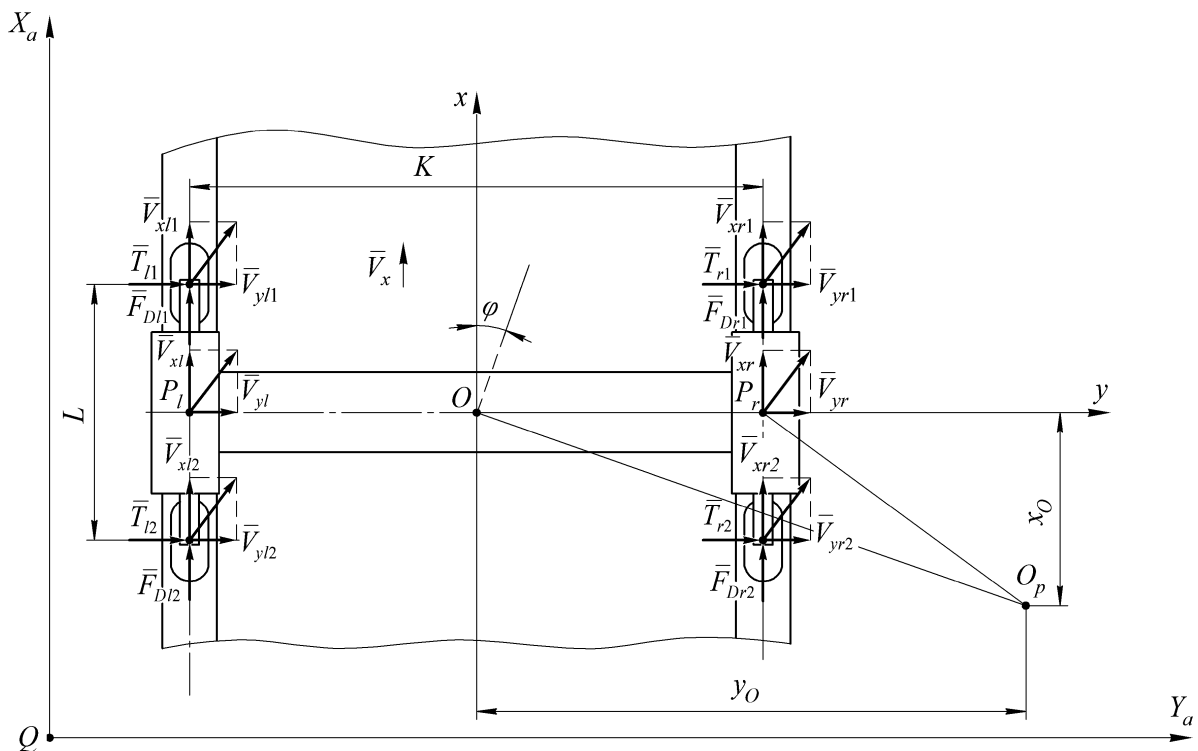
Рис. 1. Мостовий агрозасіб під час проведення експериментальних досліджень у ґрунтовому каналі

Fig. 1. Wide span agricultural vehicle during experimental research in the soil channel

Даний мостовий агрозасіб (рис. 1) містить: два електричні двигуни, силовий привод, ходову частину, механізми керування та технологічне обладнання. Ходова частина мостового агрозасобу являє собою візок, що складається з рами, до якої на чотирьох півосях кріпляться колеса з пневматичними шинами типорозміру 9.5R32. Два двигуни з мотор-редукторами, розташованими на правому та лівому бортах мостового агрозасобу, є джерелом механічної енергії, яка приводить в обертання відповідно колеса лівого та правого його бортів через ланцюгові та зубчасті передачі. Начіпна технологічна система мостового агрозасобу запозичена в традиційного трактора й містить основний

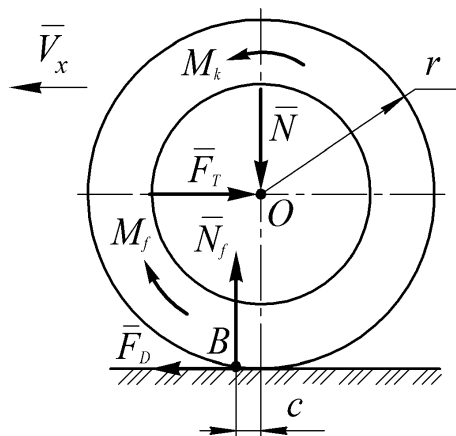
гідравлічний циліндр, нижні й верхні тяги та розкоси. За допомогою начіпної системи сільськогосподарські машини та знаряддя агрегатуються з мостовим агрозасобом.

**Результати досліджень.** Для аналітичного дослідження процесу автоматичного водіння агрозасобу розглянемо схему реалізації ним бортового повороту. Для цього побудуємо спочатку його еквівалентну схему здійснення ним бортового (силового) повороту в горизонтальній площині в нерухомій декартовій системі координат  $X_a Q Y_a$ , який реалізується завдяки різній частоті обертання коліс його лівого та правого бортів (рис. 2).



**Рис. 2.** Кінематика бортового (силового) повороту агрозасобу  
**Fig. 2.** Kinematics onboard (power) turn of agricultural vehicle

У ведучому режимі на кожне колесо радіусом  $r$  агрозасобу діють такі сили та моменти сил (рис. 3): вертикальне навантаження  $N$ , дотична сила  $F_D$  і реакція осі колеса  $F_T$ , крутний момент  $M_k$  і момент опору коченню  $M_f$ , утворений парою сил  $N$  і реакцією  $N_f$ , бічна сила  $T$  (рис. 2). Під час кочення колеса агрозасобу, навантаженого бічною силою  $T$ , у напрямку осі  $Ox$  зі швидкістю  $V_x$  відбувається деформація шини в бічному напрямку, що призводить до бічного уведення шини – появи складової швидкості  $V_y$ .



**Рис. 3.** Схема сил і моментів сил, що діють на колесо агрозасобу у ведучому режимі  
**Fig. 3.** The scheme of forces and the moment of forces that affect on agricultural vehicle wheel in the leading mode

Для подолання сил опору повороту до коліс правого та лівого бортів агрозасобу (рис. 2) повинні бути підведені різні за величиною крутні моменти  $M_{ki}$ , які забезпечать різні значення дотичних сил  $F_{Di}$ :

$$F_{Di} = \frac{(M_{ki} - M_{fi})}{r_i}, \quad (1)$$

де  $M_{ki}$  – крутний момент, що підводиться до  $i$ -того колеса;

$M_{fi}$  – момент опору коченню  $i$ -того колеса;

$r_i$  – динамічний радіус  $i$ -того колеса.

Через різницю значень ведучих моментів  $M_k$ , підведених до коліс лівого та правого бортів агрозасобу, відбувається поява моменту сил  $M_p$  у горизонтальній площині:

$$M_p = \frac{1}{2}K(F_{Dl1} + F_{Dl2} - F_{Dr1} - F_{Dr2}) \neq 0, \quad (2)$$

де  $K$  – відстань між поздовжніми осями коліс (рис. 2);

$F_{Dl1}$ ,  $F_{Dl2}$  і  $F_{Dr1}$ ,  $F_{Dr2}$  – дотичні сили, що прикладені до передніх і задніх коліс лівого та правого бортів агрозасобу, відповідно.

Поява моменту сил  $M_p$  викликає зміну напрямку руху мостового агрозасобу. Опір його повороту викликає момент  $M_T$  бічних сил взаємодії коліс з опорною поверхнею, який можна вважати стабілізуючим моментом, а також момент сил інерції  $M_j$ , отже:

$$M_p = M_T + M_j = \frac{1}{2}L(T_{l1} + T_{r1} - T_{l2} - T_{r2}) + J_m \left( \frac{d_2 \varphi}{dt^2} \right), \quad (3)$$

де  $M_T$  – момент бічних сил взаємодії коліс мостового агрозасобу з опорною поверхнею;

$M_j$  – момент сил інерції агрозасобу;

$T_{l1}, T_{r1}, T_{l2}, T_{r2}$  – бічні сили, що прикладені до передніх і задніх коліс лівого та правого бортів агрозасобу, відповідно;

$J_m$  – момент інерції агрозасобу в горизонтальній площині;

$\frac{d_2\varphi}{dt^2}$  – кутове прискорення агрозасобу в горизонтальній площині, яке має місце під час входу його в поворот і виходу з повороту й дорівнює нулю під час сталого повороту, тобто під час повороту з постійним радіусом.

Отже, для сталого повороту завжди виконується рівність:

$$\frac{1}{2}K(F_{Dl1} + F_{Dr2} - F_{Dr1} - F_{Dl2}) = \frac{1}{2}L(T_{l1} + T_{r1} - T_{l2} - T_{r2}), \quad (4)$$

звідки отримуємо:

$$(F_{Dl1} + F_{Dr2} - F_{Dr1} - F_{Dl2}) = \frac{L}{K}(T_{l1} + T_{r1} - T_{l2} - T_{r2}). \quad (5)$$

З аналізу рівності (5) випливає, що управління поворотом мостового агрозасобу завдяки різниці моментів, підведених до коліс правого та лівого його бортів, на відміну від аналогічного способу повороту гусеничного трактора, вимагає меншої їхньої різниці через велику ширину колії  $K$  та меншу базу  $L$  першого, порівнюючи з другим.

У системі координат  $xOy$ , що жорстко зв'язана з мостовим агрозасобом (рис. 2), положення миттєвого центру повороту  $O_p$  визначає значення відносних швидкостей коліс у системі координат  $X_aQY_a$ . Зокрема для умовного центру  $P_l$  середини коліс лівого борту мостового агрозасобу значення складових швидкостей  $V_{xl}$  і  $V_{yl}$  знайдемо в такий спосіб:

$$V_{xl} = \frac{d\varphi}{dt} \left( y_0 + \frac{1}{2}K \right) \quad (6)$$

і

$$V_{yl} = \frac{d\varphi}{dt} x_0, \quad (7)$$

де  $\frac{d\varphi}{dt}$  – кутова швидкість повороту мостового агрозасобу в горизонтальній площині.

Аналогічно знаходимо значення складових швидкостей  $V_{xr}$  і  $V_{yr}$  для умовного центру  $P_r$  середини коліс правого борту агрозасобу:

$$V_{xr} = \frac{d\varphi}{dt} \left( y_0 - \frac{1}{2}K \right) \quad (8)$$

і

$$V_{yr} = \frac{d\varphi}{dt} x_0. \quad (9)$$

З виразів (7) і (9) випливає, що в разі ідентичності розмірів і пружних властивостей шин коліс мостового агрозасобу та їх взаємодії з опорною поверхнею слідів постійної технологічної колії, впливу на нього поворотного моменту в горизонтальній площині, повинні бути однаковими за абсолютною величиною, але протилежно спрямованими бічні деформації шин, які визначають їхнє бічне уведення та швидкість у поперечному напрямку, тобто  $V_{yl} = -V_{yr}$ . Зазначена рівність швидкостей можлива тільки за умови  $x_0 = L \cdot 2^{-1}$ . Тобто точка миттєвого центру повороту мостового агрозасобу завжди повинна знаходитися на осі поперечної симетрії його шасі.

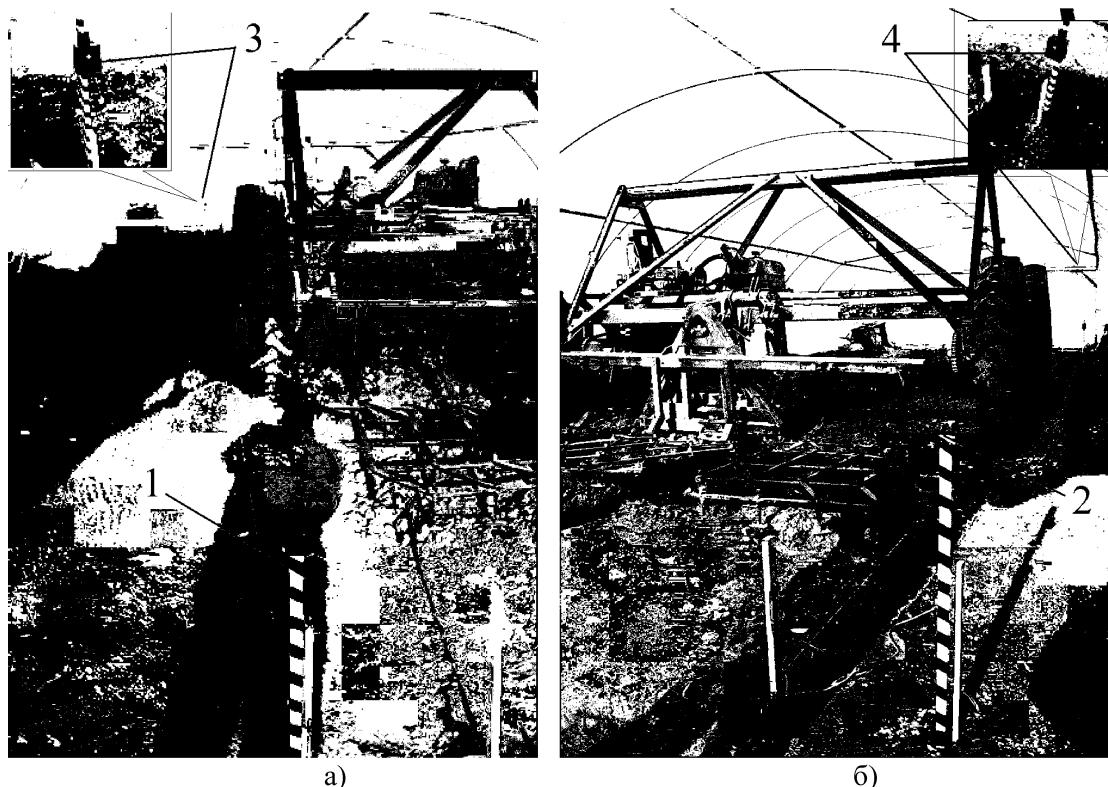
Перспективним для автоматизації водіння агрозасобу по слідах постійної технологічної колії з чисто бортовим (силовим) способом його повороту, на нашу думку, є використання лазерного (або іншої природи) променя як задавача траєкторії. На відміну від відомих лазерних систем у разі водіння агрозасобу по променю визначення його положення повинно відбуватися безпосередньо відносно двох фіксованих ліній, якими є зовнішні кромки пари технологічних колій.

Для реалізації й аналізу результатів запропонованого способу автоматизованого водіння мостового агрозасобу по слідах



постійної технологічної колії з використанням лазерного променя були проведені експериментальні дослідження. Розміщення

обладнання для лазерного прокладання траєкторії руху агрозасобу представлено на рисунку 4.



**Рис. 4.** Розміщення обладнання для лазерного прокладання траєкторії руху агрозасобу з лівого (а) та правого (б) боків технологічних колій:

1, 2 – випромінювач; 3, 4 – приймач

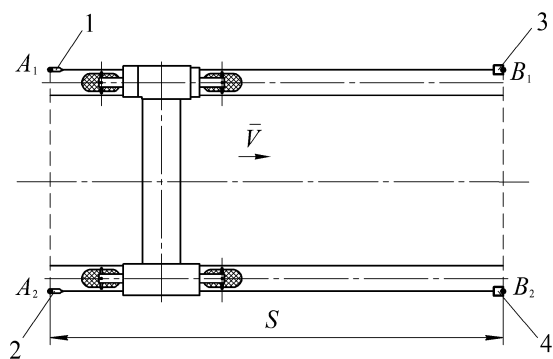
**Fig. 4.** Placement of equipment for laser laying of the agricultural vehicle trajectory on the left (a) and right (b) sides of the technology track:

1, 2 – emitter; 3, 4 – receiver

Обладнання для лазерного прокладання траєкторії руху агрозасобу та його автоматичне водіння по слідах постійної технологічної колії нами було реалізовано таким чином. Два лазерні випромінювачі 1 і 2 (рис. 5) в точках  $A_1$  і  $A_2$  на початку гонів були встановлені на штативах із лівого та правого країв постійної технологічної колії (рис. 4). Їх розміщення було точно горизонтально орієнтоване відносно слідів постійної технологічної колії. Своїм лазерним променем вони створювали оптичну лінію, яка була межею зони розміщення агрозасобу в слідах постійної технологічної колії.

Два фотоприймальні пристрої 3 і 4, які є фотоприймачами-мішенями, за допомогою спеціальних механізмів були симетрично встановлені з іншого кінця гонів у точках  $B_1$  і  $B_2$  (рис. 5), аналогічно з лівого та правого зовнішніх країв постійної технологічної

колії. Кожний фотоприймальний пристрій складався з фотодіодів, підключених до входу свого підсилювача.



**Рис. 5.** Схема водіння агрозасобу по лазерному променю

**Fig. 5.** The scheme of agriculture vehicle driving on a laser beam

У процесі руху мостового агрозасобу зовнішні збурення, що діють на нього, відхиляють його від заданої прямолінійної

траєкторії. Межею його лівостороннього або правостороннього зміщень у такому разі є зовнішня крайка постійної технологічної колії. Ці межі на рисунку 5 представлені лініями  $A_1B_1$  і  $A_2B_2$ , відповідно. Якщо внаслідок поперечного зміщення агрозасобу в процесі його руху він своїми габаритами перетинає зазначені лінії, то залежно від того, на який (лівий або правий) фотодіод перестає потрапляти лазерний промінь, генерується сигнал його відхилення від заданої траєкторії. Цей сигнал подається на відповідний приводний електричний двигун агрозасобу, за допомогою якого змінюються оберти в приводі

коліс одного з його бортів. Зокрема, якщо правими колесами агрозасобу перекривається потрапляння лазерного променя в фотоприймальний пристрій (тобто відбувається перетин лінії  $A_2B_2$ ), то його зміщення відбулося вправо. У такому разі автоматичною системою зменшуються оберти в приводі коліс його лівого борту. Після відновлення подачі лазерного променя у фотоприймальний пристрій прямолінійний рух агрозасобу поновлюється.

Принципова електрична схема автоматичного керування рухом агрозасобу представлена на рисунку 6.

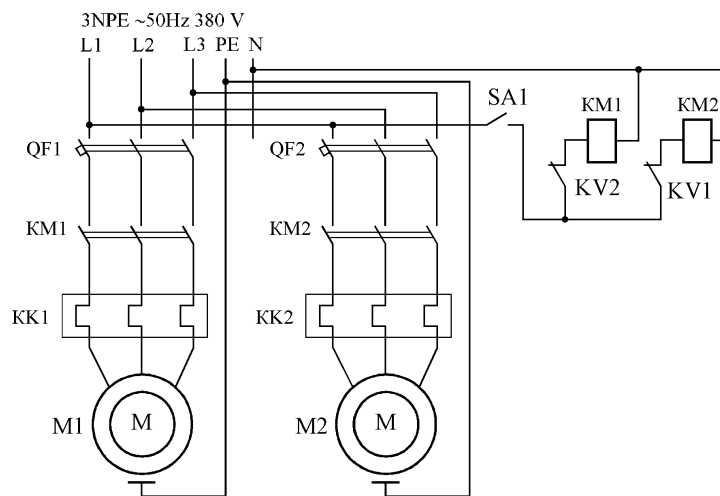


Рис. 6. Принципова електрична схема керування водінням агрозасобу в автоматичному режимі (силова частина)

Fig. 6. Basic electrical control circuit of the agricultural vehicle in automatic mode (power part)

На рисунку 6 показано схему підключення двох електричних двигунів агрозасобу, потужність яких витрачається на привод коліс його лівого та правого бортів, відповідно.

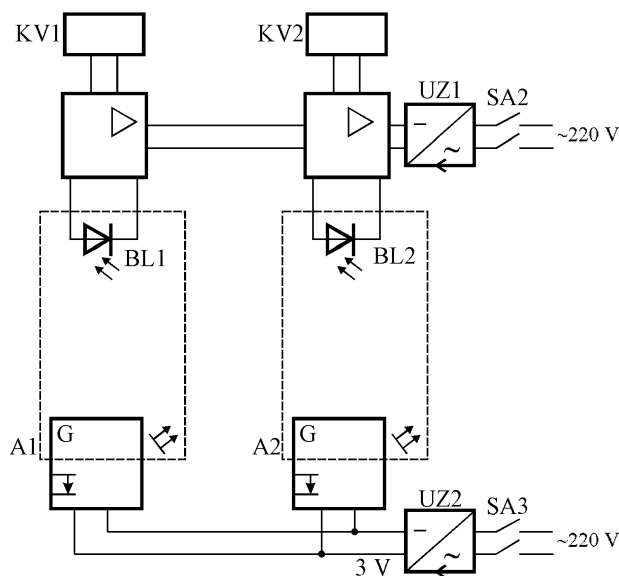
Схема автоматизації керування водінням агрозасобу з використанням датчиків випромінювання-фотоприймання представлена на рисунку 7.

Проведені дослідження процесу автоматичного водіння агрозасобу з використанням лазерного променя показали, що для досягнення високої точності розміщення лазерного променя при водінні агрозасобу по прямолінійній траєкторії необхідна фіксація двох точок з двох сторін поля на відстані  $s$  (рис. 5). Якщо випромінювач встановлений у точці  $A_1$ , то для досягнення заданої точності водіння агрозасобу промінь повинен потрапляти у точку  $B_2$  із заданою точністю  $\pm\delta_s$ . Для цього необхідно підтримувати умову точності положення випромінювача  $\pm\Delta\alpha$ , за якою повинна мати місце така нерівність:

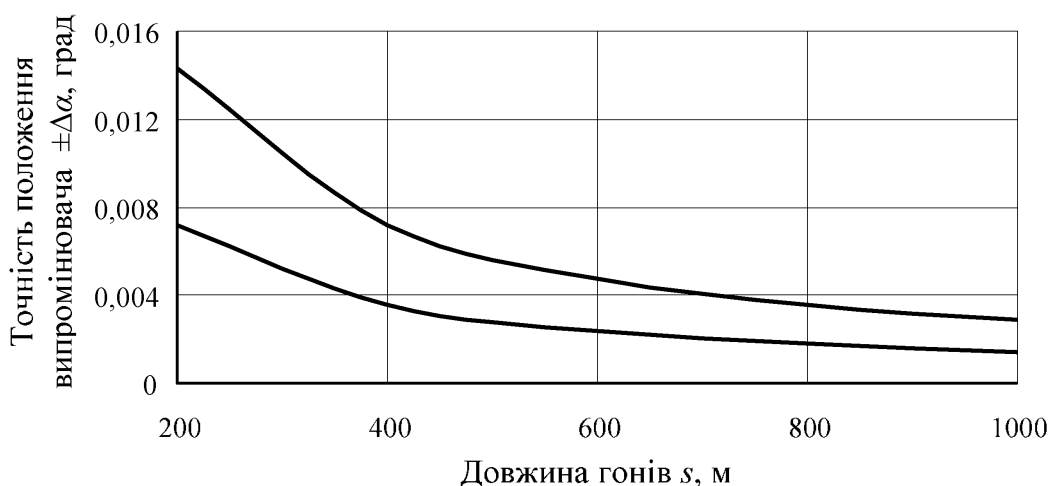
$$\pm\Delta\alpha \leq \arctan\left(\frac{\pm\delta_s}{s}\right), \quad (10)$$

де  $\pm\delta_s$  – задана точність подачі лазерного променя від випромінювача;  
 $s$  – довжина гонів.

Результати розрахунків необхідної точності  $\pm\Delta\alpha$  положення випромінювача за виразом (10) представлені на рисунку 8.



**Рис. 7.** Схема системи автоматичного керування рухом агрозасобу  
**Fig. 7.** Scheme of the automatic control system of the agricultural vehicle



**Рис. 8.** Залежність точності положення випромінювача  $\pm\Delta\alpha$  від довжини гонів  $s$  за різною точністю  $\pm\delta_s$  подачі лазерного променя від випромінювача:

$$1 - \pm\delta_s = \pm 0,025 \text{ м}; 2 - \pm\delta_s = \pm 0,05 \text{ м}$$

**Fig. 8.** Dependence of accuracy of position of the emitter  $\pm\Delta\alpha$  on the rutting length  $s$  at different accuracy  $\pm\delta_s$  of laser beam from emitter:

$$1 - \pm\delta_s = \pm 0.025 \text{ m}; 2 - \pm\delta_s = \pm 0.05 \text{ m}$$

З аналізу графіків, представлених на рисунку 8, випливає, що зі зменшенням точності подачі лазерного променя від випромінювача у два рази ( $\pm\delta_s = \pm 0,05$  м) необхідна точність положення випромінювача  $\pm\Delta\alpha$  зменшується пропорційно у два рази.

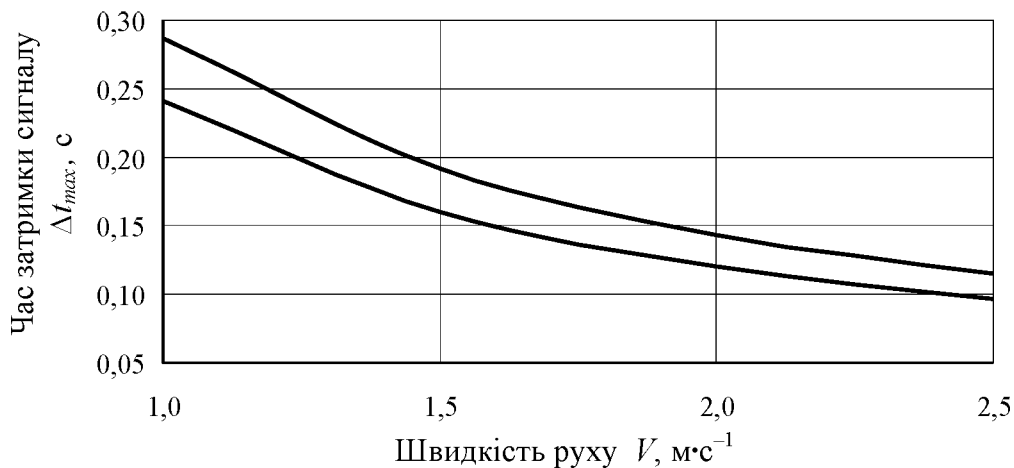
Під час руху агрозасобу в прямолінійному напрямку з постійною швидкістю  $V$  максимальний час затримки сигналу  $\Delta t_{\max}$  автоматизованою системою його керування для виконання бортового (силового) повороту за заданої точності положення променя  $\pm\delta_s$  має бути не більшим за таку величину:

$$\Delta t_{\max} = \frac{\pm \delta_s}{V \cdot \sin \varphi}, \quad (11)$$

де  $V$  – швидкість руху агрозасобу;

$\varphi$  – курсовий кут повороту мостового агрозасобу в горизонтальній площині.

Аналіз результатів із визначення максимально можливого часу затримки сигналу автоматизованою системою керування мостового агрозасобу показав, що в разі курсового його відхилення в межах  $0 \dots 5$  град. величина  $\Delta t_{\max}$  дорівнює  $0,11$  с за швидкості його руху  $2,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (рис. 9).



**Рис. 9.** Залежність максимально можливого часу  $\Delta t_{\max}$  затримки сигналу від швидкості руху  $V$  мостового агрозасобу за різної амплітуди  $\varphi$  його курсових відхилень:  
1 –  $\varphi = 5$  град.; 2 –  $\varphi = 12$  град.

**Fig. 9.** Dependence of maximum possible signal delay time  $\Delta t_{\max}$  from the speed  $V$  of wide span agricultural vehicle at different amplitude  $\varphi$  of its course deviations:  
1 –  $\varphi = 5$  deg.; 2 –  $\varphi = 12$  deg.

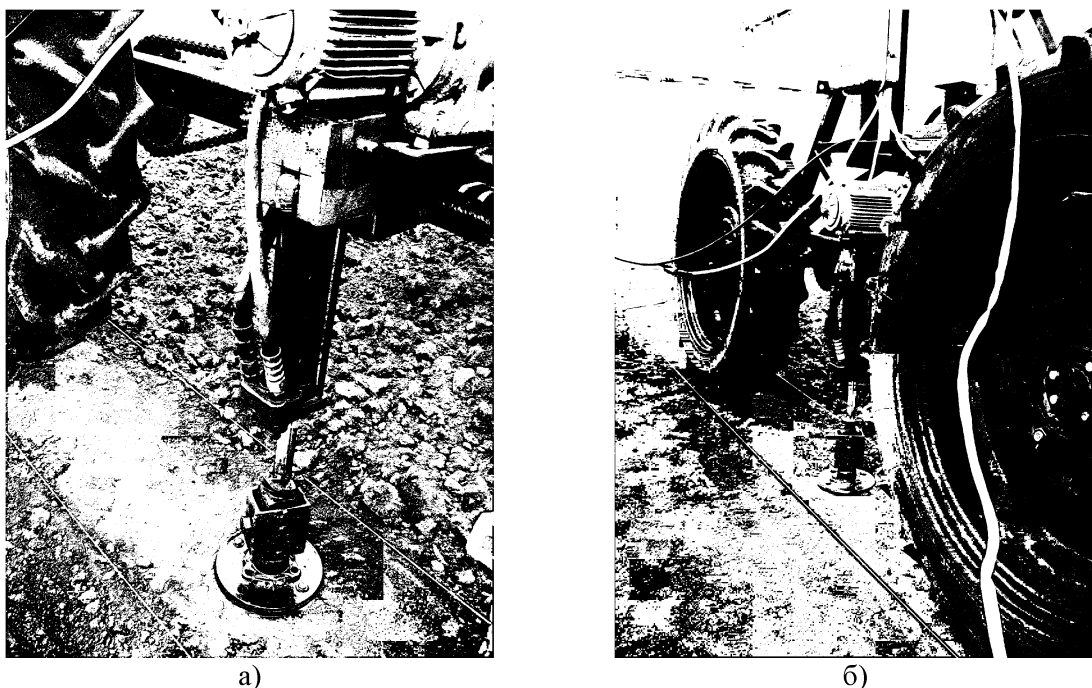
Зі зменшенням швидкості руху  $V$  мостового агрозасобу з  $2,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  максимально можливий час  $\Delta t_{\max}$  експоненціально збільшується (рис. 9), що є бажаним для більш стабільної роботи автоматизованої системи його керування. Як видно з графіка (рис. 9), за швидкостей руху мостового засобу близько  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , час  $\Delta t_{\max}$  має бути не більшим за  $0,3$  с. Тому реалізована на агрозасобі система його керування в автоматичному режимі проявила себе більш стабільно саме на малих швидкостях його руху.

Якщо курсова стійкість руху мостового агрозасобу буде така, що амплітуда його кутових коливань  $\varphi$  досягне  $12$  град., то згідно з (11) час  $\Delta t_{\max}$  зменшиться приблизно на  $16\%$  (рис. 9). А це сприяє підвищенню вимог до роботи автоматизованої системи керування мостового агрозасобу.

Слід зазначити й певні труднощі в реалізації запропонованого нами способу

автоматичного водіння мостового агрозасобу слідами постійної технологічної колії за допомогою випромінювачів і відбивачів, розміщених на протилежних кінцях поля. Головним недоліком є необхідність для кожного його проходу виконувати перестановку системи випромінювання-фотоприймання в нові технологічні колії. Зрозуміло, що для повної автоматизації роботи мостового агрозасобу на полі кожна технологічна колія повинна бути обладнана датчиками випромінювання-фотоприймання. Незважаючи на певні витрати на обладнання поля такими системами, важливою перевагою запропонованого нами способу автоматичного водіння мостового агрозасобу є відсутність необхідності для цього GPS-апаратури.

Поворот агрозасобу здійснювався за допомогою опорних стійок силових домкратів (рис. 10), розміщених на нижній поверхні його платформ для підйому правого або лівого бортів, відповідно.



**Рис. 10.** Технічна реалізація повороту агрозасобу:  
 а) розміщення силового домкрату на агрозасобі;  
 б) агрозасіб у виваженому стані під час здійснення маневру повороту

**Fig. 10.** Technical realization of agricultural vehicle turn:  
 a) placement of a power jack on agro means;  
 b) agricultural means in a balanced state during the turn maneuver

Експериментальне хронометрування часу на виконання маневру силового (бортового) повороту  $t_{\text{пов}}$  на поворотній смузі показало, що загальна тривалість цього процесу становить близько 1 хв. (0,0167 год.). Такий результат є цілком прийнятним, порівнюючи з тривалістю виконання маневру повороту традиційних широкозахватних машинно-тракторних агрегатів. Якщо мати можливість здійснювати цей процес в автоматичному режимі, то отриману тривалість часу на виконання маневру повороту агрозасобом можна зменшити щонайменше вдвічі.

#### Висновки

1. Автоматизація водіння мостового агрозасобу з бортовим (силовим) способом його повороту по слідах постійної технологічної колії вимагає значно меншої різниці моментів, підведених до коліс правого та лівого його бортів, порівнюючи з традиційним трактором. Ця різниця пропорційна ширині колії агрозасобу за відносно меншої величини його колісної бази.

2. Отримання найменших енергетичних витрат на виконання бортового (силового) повороту мостового агрозасобу можна досягти за рівних за абсолютною величиною,

але протилежно напрямлених бічних деформацій шин коліс його лівого та правого бортів. Для цього бортовий (силовий) поворот агрозасобу слід здійснювати так, щоб миттєвий центр його повороту знаходився на осі поперечної симетрії його шасі.

3. Точність положення лазерного випромінювача за умови автоматизації водіння мостового агрозасобу за довжини гонів 1000 м повинна знаходитися на рівні 0,0014 град. Досягти такої точності можна, якщо використовувати спеціальні лазерні випромінювачі, яким властива висока точність, або додатково обладнати агрозасоби системою «ближньої» навігації, що здатна фіксувати положення орієнтирів, пов'язаних із технологічною колією.

4. У разі курсових відхилень мостового агрозасобу в процесі свого руху в межах 5 град. і швидкості  $2,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  величина затримки сигналу автоматизованою системою керування повинна бути не більшою за 0,11 с. Зі зменшенням швидкості руху мостового агрозасобу величина затримки зазначеного сигналу експоненціально збільшується, що знижує вимоги до роботи такої системи. Зі збільшенням амплітуди курсових відхилень мостового агрозасобу до 12 град. величина

затримки сигналу автоматизованою системою керування дещо зменшується (на 16%). Тому покращення стійкості руху мостових агрозасобів дозволить підвищити якість їх автоматичного водіння з бортовим поворотом по слідах постійної технологічної колії.

5. Загалом агрегування мостового агрозасобу, його ручне та автоматичне керування, а також виконання ним силового (бортового) способу повороту не створюють будь-яких проблем як для оператора, так і для автоматизації цих процесів.

### Бібліографія

1. Mihajlow, R., Demirev, V. Application of GPS navigation in agricultural aggregates. *Annual Journal of Technical University of Varna*. 2018. Vol. 2 (2). Pp. 14–19. DOI: 10.29114/ajtuv.vol2.iss2.84

2. Chebrolu, N., Lottem, P., Schaeffer, A., Winterhalter, W., Burgard, W., Stachniss, C. Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields. *The International Journal of Robotics Research*. 2017. Vol. 36. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364917720510>

3. Griepentrog H. W., Andersen N. A., Andersen J. C., Blanke, M. et al. Safe and reliable: Further development of a field robot. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture “Precision Agriculture”* (6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> July 2009, Wageningen, the Netherlands) 2009. Vol. 9. Pp. 857–866.

4. Longo, D., Muscato, G. Design and simulation of two robotic systems for automatic artichoke harvesting. *Robotics*, 2013. Vol. 2 (4). Pp. 217–230. DOI: 10.3390/robotics2040217

5. He, B., Liu, G., Ji, Y. Auto recognition of navigation path for harvest robot based on machine vision. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*. 2011. Vol. 344. Pp. 138–148. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1_19)

6. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Nadykto, V., Kyurchev, V., Nozdrovický, L. Theoretical consideration of the controllability indicator of machine-tractor movement. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 1. Pp. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0003>

7. Bulgakov, V., Findura, P., Kročko, V., Nozdrovický, L. Experimental study of operational properties of two-machine drilling aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 2. Pp. 81–86. DOI: 10.2478/ata-2018-0015

8. Rothacher, M. Basics of GPS Data. *Proceedings of International Symposium on GPS* (18–22 October, Tsukuba, Japan). 1999.

9. Ji, C., Zhou, J. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2014. Vol. 45 (9). Pp. 44–54. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008

10. Zhu, Q., Gao, G., Niu, W. The automatic navigation driving system of agricultural machinery. *Modern Agriculture*. 2016. Vol. 5. Pp. 65–67.

11. Bakker, T., Van, A., Bontsema, J., Mülle, J. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. *Biosystems Engineering*. 2011. Vol. 109 (4). Pp. 357–368. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.001

12. Luo, X., Zhang, Z., Zhao, Z. et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2009. Vol. 25 (11). Pp. 139–145.

13. Yang, L., Luo, T., Cheng, X. et al. Universal autopilot system of tractor based on Raspberry Pi. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 21. Pp. 109–115.

14. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Kuvachov, V., Arak, M., Jüri Olt. Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming. *Processing 28th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation* (8<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> November 2017, Zadar, Croatia). 2017. Vol. 1. Pp. 0199–0208. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.027

### Bibliografija

1. Mihajlow, R., Demirev, V. (2018). Application of GPS navigation in agricultural aggregates. *Annual Journal of Technical University of Varna*, 2 (2), 14–19. DOI: 10.29114/ajtuv.vol2.iss2.84

2. Chebrolu, N., Lottem, P., Schaeffer, A., Winterhalter, W., Burgard, W., Stachniss, C. (2017). Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields. *The International Journal of Robotics Research*, 36. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364917720510>

3. Griepentrog, H. W., Andersen, N. A., Andersen, J. C., Blanke, M. et al. Safe and reliable: Further development of a field robot. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture “Precision Agriculture”* (6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> July 2009, Wageningen, the Netherlands) 2009. Vol. 9. Pp. 857–866.

4. Longo, D., Muscato, G. (2013). Design and simulation of two robotic systems for automatic artichoke harvesting. *Robotics*, 2 (4), 217–230. DOI: 10.3390/robotics2040217

5. He, B., Liu, G., Ji, Y. (2011). Auto recognition of navigation path for harvest robot based on machine vision. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, 344, 138–148. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1_19)

6. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Nadykto, V., Kyurchev, V., Nozdrovický, L. (2017). Theoretical consideration of the controllability indicator of machine-tractor movement. *Acta Technologica Agriculturae*, 1, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0003>

7. Bulgakov, V., Findura, P., Kročko, V., Nozdrovický, L. (2018). Experimental study of operational properties of two-machine drilling

- aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 81–86. DOI: 10.2478/ata-2018-0015
8. Rothacher, M. (1999). Basics of GPS Data. *Processing International Symposium on GPS* (18–22 October, Tsukuba, Japan).
9. Ji, C., Zhou, J. (2014). Current situation of navigation technologies for agricultural machinery. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45 (9), 44–54. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008
10. Zhu, Q., Gao, G., Niu, W. (2016). The automatic navigation driving system of agricultural machinery. *Modern Agriculture*, 5, 65–67.
11. Bakker, T., Van, A., Bontsema, J., Müller, J. (2011). Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. *Biosystems Engineering*, 109 (4), 357–368. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.001
12. Luo, X., Zhang, Z., Zhao, Z. et al. (2009). Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25 (11), 139–145.
13. Yang, L., Luo, T., Cheng, X. et al. (2015). Universal autopilot system of tractor based on Raspberry Pi. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 21, 109–115.
14. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Kuvachov, V., Arak, M., Jüri Olt (2017). Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming. *Proceeding 28th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation* (8<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> November 2017, Zadar, Croatia). 2017. Vol. 1. Pp. 0199–0208. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.027
- July 2009, Wageningen, the Netherlands) 2009. Vol. 9. Pp. 857–866.
4. Longo, D., & Muscato, G. (2013). Design and simulation of two robotic systems for automatic artichoke harvesting. *Robotics*, 2 (4), 217–230. DOI: 10.3390/robotics2040217
5. He, B., Liu, G., & Ji, Y. (2011). Auto recognition of navigation path for harvest robot based on machine vision. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, 344, 138–148. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18333-1_19)
6. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Nadykto, V., Kyurchev, V., & Nozdrovický, L. (2017). Theoretical consideration of the controllability indicator of machine-tractor movement. *Acta Technologica Agriculturae*, 1, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0003>
7. Bulgakov, V., Findura, P., Kročko, V., & Nozdrovický, L. (2018). Experimental study of operational properties of two-machine drilling aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 81–86. DOI: 10.2478/ata-2018-0015
8. Rothacher, M. (1999). Basics of GPS Data. *Proceeding of the International Symposium on GPS* (18<sup>th</sup>-22<sup>th</sup> October, Tsukuba, Japan).
9. Ji, C., & Zhou, J. (2014). Current situation of navigation technologies for agricultural machinery. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45 (9), 44–54. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008
10. Zhu, Q., Gao, G., & Niu, W. (2016). The automatic navigation driving system of agricultural machinery. *Modern Agriculture*, 5, 65–67.
11. Bakker, T., Van, A., Bontsema, J., & Müller, J. (2011). Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. *Biosystems Engineering*, 109 (4), 357–368. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.001
12. Luo, X., Zhang, Z., & Zhao, Z. (2009). Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25 (11), 139–145.
13. Yang, L., Luo, T., & Cheng, X. (2015). Universal autopilot system of tractor based on Raspberry Pi. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 21, 109–115.
14. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Kuvachov, V., Arak, M., & Jüri Olt (2017). Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming. *Proceeding of the 28th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation* (8<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> November, Zadar, Croatia), vol. 1, 0199–0208. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.027

### References

1. Mihajlow, R., & Demirev, V. (2018). Application of GPS navigation in agricultural aggregates. *Annual Journal of Technical University of Varna*, 2 (2), 14–19. DOI: 10.29114/ajtuv.vol2.iss2.84

2. Chebrolu, N., Lottem, P., Schaeffer, A., Winterhalter, W., Burgard, W., & Stachniss, C. (2017). Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields. *The International Journal of Robotics Research*, 36. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364917720510>

3. Griepentrog, H. W., Andersen, N. A., Andersen, J. C., Blanke, M. O., Heinemann, O., Madsen, T. E., ... & Wulfsohn, D. (2009). Safe and reliable: Further development of a field robot. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture "Precision Agriculture"* (6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>