

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

*Андрей Бондарь*

*Таврический государственный агротехнологический университет  
Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, 72310, Украина E-mail: [ban1977@i.ua](mailto:ban1977@i.ua)*

*Andriy Bondar*

*Tavria State Agrotechnological University  
B. Khmelnytsky Avenue, 18, Melitopol, 72310, Ukraine E-mail: [ban1977@i.ua](mailto:ban1977@i.ua)*

**Аннотация.** Работа посвящена изучению новых типов управления направлением движения мобильных машин. Рассмотрены наиболее перспективные решения, которые позволяют получать переменное передаточное отношение рулевого механизма в зависимости от скорости движения мобильной машины. Приведены схемы движения гусеничных и колесных машин, а также математическое описание этого процесса. Причём все рассматриваемые схемы рулевых приводов относятся к наиболее распространенным в настоящее время. Предложен ряд конструктивных решений рулевых приводов для гусеничных и колесных тракторов, причем приведены схемы, как для легких типов тракторов (которые не имеют гидроусилителя), так и тяжелых (которые имеют гидрообъемное рулевое управление). Показана перспективность электромеханических усилителей руля (ЭМУР) и возможность их использования в качестве асинхронного сервопривода. На каждое конструктивное решение приводится схема с подробным описанием её действия и составных элементов. Такие технические решения стали необходимыми в связи с постоянно растущими технологическими скоростями работы. Проведенные исследования показали преимущество предложенных технических решений по отношению к традиционным, поскольку скорость реакции водителя уменьшается, а качество отслеживания траектории повышается на порядок. Проанализирована работа оператора мобильной машины с эргономической точки. Одним из основных факторов, влияющих на скорость реакции оператора, особенно на разворотных полосах, является продольная скорость мобильной машины и интенсивность воздействия оператора на рулевое колесо. Установлено, что скорость его реакции зависит от скорости движения машины, внешних факторов (освещенности, видимости, загрязненности поля, усталости оператора, криволинейности рядков и др.) и находится в пределах 0,5 – 2,5 с.

**Ключевые слова:** человек-оператор, объект управления, объемно-гидравлическое рулевое управление (ОГРУ), электромеханический усилитель рулевого управления (ЭМРУ), сервопривод, качество отслеживания траектории движения (добротность).

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Традиционные системы рулевого управления мобильных машин достаточно просты, но способ управления объектом, который является интегратором с переменной скоростью накопления, достаточно сложный и препятствует оператору точно и быстро управлять направлением движения машины. Особенно это сказывается при выполнении сельскохозяйственных работ [5].

Основные недостатки:

- с ростом скорости чувствительность руля линейно нарастает, ошибка отслеживания растет квадратично и на повышенных скоростях система работает на пределе устойчивости. Попытка снизить чувствительность за счет передаточного отношения рулевого привода резко ухудшает маневренность машины.

- время реакции водителя лежит в пределах 0,5 - 2,5с., что обусловлено сложностью прогнозирования "поведения" интегратора [1]. Есть необходимость конструктивного воплощения новых с учетом тенденций развития и использования компонентов современных систем рулевых управлений. На сегодня намечены два перспективных пути развития рулевых приводов:

- обеспечение постоянной чувствительности рулевого управления;

- способ управления по положению. Актуальной является проблема улучшения управляемости мобильных машин. Ученые, которые занимались этой проблемой указывали на перспективность такого направления [1, 2]. Однако технического решения предложено не было, потому что в рамках механической схемы это слишком сложно. Известно, что человек-оператор легче и точно осуществляет операции наблюдения за отклонением контролируемого параметра при управлении (по положению) [1]. В этом случае объект управления является простым усилителем, где положение руля определяет направление движения мобильной машины. Предварительный анализ преимуществ такого способа управления были приведены в работе [2], где была применена методика интерактивного моделирования. Существующие системы рулевого управления мобильных машин является интегратором с переменной скоростью накопления это существенно мешает оператору точно и быстро управлять направлением движения машины [3, 10-14, 20]. Принцип постоянной чувствительности рулевого управления

состоит в том, что передаточное отношение рулевого механизма изменяется в зависимости от скорости движения колесной машины [16]. Существует необходимость конструктивного воплощения способа управления "по положению" без значительных осложнений системы рулевых управлений мобильных машин. Также необходимо помнить, что мобильным машинам предъявляются требования по высокой эффективности [4] (качеству отслеживания траектории) и надежности [5].

Рассматривать эту проблему с технической точки зрения не корректно так как задача становится чрезвычайно узкой и проблема может быть решена если мы сможем использовать «идеальный регулятор», который сможет вовремя отреагировать на кинематические последствия любого возмущающего воздействия [11,12]. Для того, чтобы выполнять всю необходимую работу, оператору необходимо в первую очередь получать постоянно информацию по всем звеньев технологического процесса. Человек-оператор может получать информацию с помощью следующих органов чувств - зрения и слуха, ощущение на ощупь, вестибулярного аппарата, а также обоняния [6, 7, 8, 9, 15]. Известно, что через зрительный канал человек получает примерно 90% информации относительно окружающей обстановки. Оператор, который управляет сельскохозяйственным агрегатом, находится в очень сложном информационном положении: ему необходимо выполнять большое количество действий в кабине (контролировать показания датчиков на панели приборов, выполнять управляющие действия рулевым колесом, манипулировать рычагами гидравлической системы сельскохозяйственных орудий, следить за неподвижными объектами и предметами которые движатся и за рядком растений, при междурядной обработке, чтобы не травмировать их рабочими органами. В реальной "человеко-машинной" системе оператор не представляет собой идеальный регулятор. Он может обратить внимание на отклонения управляющего воздействия от нормы лишь в том случае, если его значение превысит предел чувствительности психических и физических свойств самого человека, которые в свою очередь зависят от многих факторов (информационной нагрузки оператора). После определения отклонений наступает время, необходимое для принятия решения. Принятое решение выполняется целым комплексом управляющих воздействий водителя и на них также необходимо время [1, 2].

#### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ традиционных систем управления движения мобильных машин показывает, что они как объект управления, являются интегратором с переменными параметрами. Можно предложить более эргономичный способ управления мобильными машинами, в рулевое управление которых встроено дифференцирующее звено. Практически это означает, что направление движения машины должно быть связано с положением рулевого колеса. Для оценки управляемости новых типов рулевых управлений

(РУ) были проведены исследования, они показали следующее: рулевое управление по положению обеспечивает на порядок более высокую точность отслеживания траектории движения и дает возможность снизить передаточное отношение рулевого привода, а также улучшить автовывод из заноса. Упрощение управления в этом случае снижает время реакции водителя вдвое, на порядок увеличивает точность отслеживания траектории [17]. На рисунках 1 и 2 приведены зависимости добротности от скорости и передаточного отношения рулевых управлений. Добротность - это отношение скорости движения к среднеквадратическому отклонению отслеживаемой траектории [1].



Рис. 1. Зависимость добротности рулевого управления от передаточного отношения

Fig. 1. The dependence of the quality factor of the steering gear ratio

Следует отметить, что добротность системы управления по положению с ростом скорости остается постоянной, ошибка отслеживания траектории растет линейно, а не квадратично как у традиционного рулевого управления (рисунок 2).



Рис. 2. Зависимость добротности от скорости движения транспортного средства

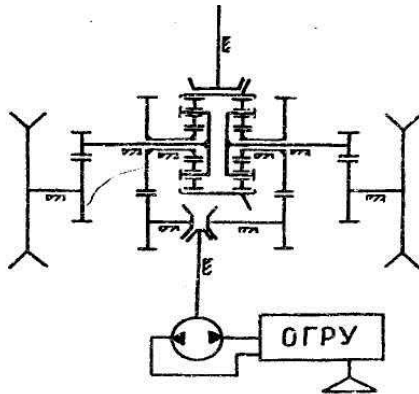
Fig. 2. The dependence of the quality factor of the speed of the vehicle

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей статьи является исследование и реализация перспективных направлений развития рулевых управлений: постоянной чувствительности и по положению для известных типов шасси мобильных машин.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для гусеничных машин, направление движения которых определяется кинематической согласованностью двигателей левого и правого борта шасси реализация способа управления по положению решается достаточно просто. Для этого в известную схему управления надо внести следующие изменения: вместо тормозных фрикционов, связанных с планетарным механизмом, установить шестерни и замкнуть их через кинематическую цепь, связанную с объемно-гидравлическим рулевым управлением, как это показано на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема реализации средства управления по положению для гусеничных шасси

**Fig. 3.** The implementation of the scheme for management position for crawler chassis

Устройство работает следующим образом: при неподвижном рулевом колесе гусеничная машина будет двигаться прямо при том, что правая и левая гусеницы движутся, согласовано, поворот рулевого колеса, независимо от режима движения, вызывает соответствующий "забег" правой гусеницы относительно левой, что вызывает соответствующий поворот транспортного средства [3]. Недостатки этой схемы очевидны: достаточно высокая сложность механической части, очень большая мощность огру, поскольку поворот осуществляется за его счет. Задача реализации управления по положению для колесных машин значительно сложнее. Это связано с тем, что в колесных машин синхронный поворот машины и рулевого колеса принципиально невозможен. Для того, чтобы решить эту задачу предлагается такой подход:

- в любой момент времени водитель с помощью руля задает направление управляемых колес в пространстве;

- при неподвижном руле система управления обеспечивает движение машины по управляемым колесам подобно при этом происходит самовозврат системы управления в нейтральное положение во время передвижения транспортного средства.

Очевидно, что система управления должна содержать два независимых канала управления [18, 19]. По первому каналу происходит задания положения направляющих элементов ходовой части (управляемых колес, передней тележки шарнирно сочлененной машины). По второму осуществляется

самовозврат системы в нейтральное положение без изменения положения направляющих элементов на местности, при этом используется информация из двух измерительных преобразователей:

- угла отклонения положения направляющих элементов ходовой части (управляемых колес, передней тележки шарнирно сочлененной машины)  $\alpha$  от нейтрального положения;

- перемещение транспортного средства (одометр).

Уравнение связи кинематических параметров и параметров движения выражаются зависимостью (1, 2), а схемы представлены на рисунке 4.

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta X}{L} \sin(\alpha); \quad (1)$$

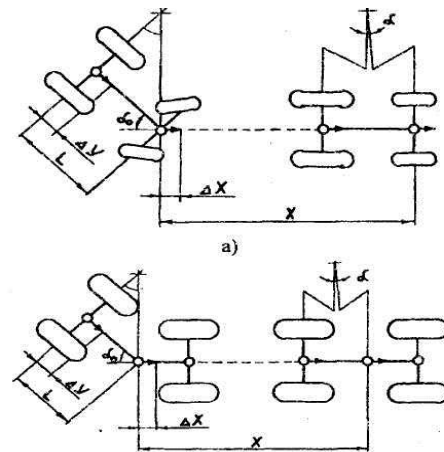
$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \cdot e^{-\frac{X}{L}}.$$

$$\Delta\alpha = -\frac{\Delta Y}{L} \cdot \operatorname{tg}(\alpha);$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\alpha_0) \cdot e^{-\frac{Y}{L}}. \quad (2)$$

где:  $\alpha$  – угол отклонения управляемых колес от нейтрального положения,  $X$  – расстояние, пройденное мобильной машиной от момента поворота до момента, когда переднее и заднее колеса будут параллельны,  $Y$  – колесная база (расстояние от задней оси до точки сочленения),

$\Delta X$  – единичное, осевое перемещение мобильной машины,  $\Delta Y$  – соответствующее единичное перемещение задних колес,  $L$  – колесная база, м.



**Рис. 4.** Схема выхода из поворота колесных шасси при неподвижном рулевом колесе:

а) шасси с передними управляемыми колесами;

б) шарнирно-сочлененное колесное шасси

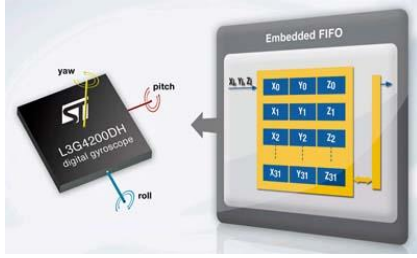
**Fig. 4.** Driving out of the rotation wheel chassis with a fixed steering wheel:

a) chassis with front wheel steering;

b) articulated wheeled chassis

Второй путь заключается в использовании автопилота. Для его реализации достаточно использовать один измерительный преобразователь положения в пространстве (гироскоп). Достаточно точный автопилот включает гироскоп. Современные электронные компоненты недорогие, надежные, эконо-

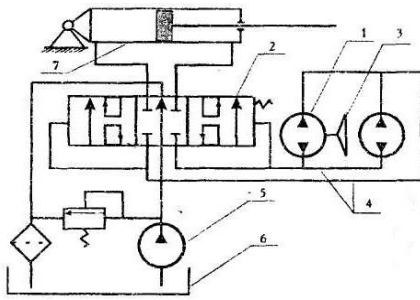
мичные и достаточно точные. Например, трехосный гироскоп L3G4200D / DH с цифровым выходом.



**Рис. 5.** Трехосный гироскоп L3G4200D / DH с цифровым выходом

**Fig. 5.** Three-axis gyro L3G4200D / DH with digital output

Благодаря малым размерам и низкому потребляемому току трехосные гироскопы L3G4200D /L3G4200DH могут применяться в системах позиционирования. Для тяжелых машин с ОГРУ (объемное гидравлическое рулевое управление) управления по положению может быть реализовано в системах со свободным золотником. Второй независимый канал управления организуется за счет введения дополнительного насоса дозатора связанного с гироскопом. Двухканальная схема рулевого управления приведена на рисунке 6.



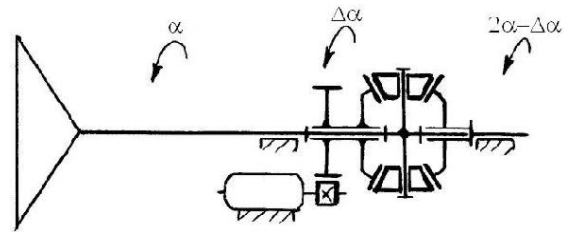
**Рис. 6.** Двухконтурное объемно-гидравлическое рулевое управление с встроенным следящим приводом: 1 – насос-дозатор, 2 – золотник, 3 – рулевое колесо, 4 – гидроканалы, 5 – питающий насос, 6 – гиробак, 7 – гидроцилиндр

**Fig. 6.** Turbofan space-hydraulic steering with integrated servo drive: 1 – metering pump, 2 – valve, 3 – ruyev wheel, 4 – water channels, 5 – feed pump, 6 – girobak, 7 – cylinder

Насос 1 связан с рулевым колесом 3 задает положение направляющих элементов ходовой части (управляемых колес, передней оси шарнирно сочлененной машины) на местности. Насос 2, связанный с гироскопом, обеспечивает неизменность положения направляющих элементов ходовой части (управляемых колес, передней оси шарнирно сочлененной машины) во время возвращения в нейтральное положение при неподвижном рулевом колесе. Но для легких колесных машин предлагается упрощенное техническое решение [6].

Модернизированная рулевая колонка позволяет осуществить управление по положению. Дифференциальный механизм обеспечивает свойства двухканального рулевого управления. Исполняющий ме-

ханизм стабилизирующей системы (шаговые двигатели незначительной мощности до 300 Вт) осуществляет поворот управляемых колес. Управляющий сигнал для шагового двигателя, можно непосредственно получить из гироскопа.



**Рис. 7.** Модернизированная рулевая колонка  
**Fig. 7.** Upgraded steering

Этот путь реализации способа управления (по положению) мобильной машиной, по сравнению с первым предпочтителен при движении на скользкой дороге, поскольку обеспечивает "автовыход" из заноса. Недостатками таких решений, является то, что корректировка действие вводится в систему управления параллельно с помощью специфического энергонасыщенного сигнала (насос дозатор, шаговый привод). Правильный подход заключается в формировании комплексного сигнала управления к стадии усиления, позволяет использовать стандартный усилитель. На этом этапе развития транспортного машиностроения ведущие мировые производители, как правило, выпускали машины, оборудованные гидроусилителем рулевого управления. Однако в последние годы гидроусилители все чаще стали заменяться электроусилителями. Электромеханический усилитель рулевого управления (ЭМУР) - абсолютно новое направление в рулевом управлении колесных машин и будет основным при разработке и оснащении новых перспективных моделей. Появление электроусилителя устраняет необходимость в насосе гидроусилителя, шлангах, гидравлических жидкостях, приводного ремня и шкиве на двигателе. В результате рулевой привод с электрическим усилителем экономит энергию и улучшает экологию окружающей среды, в то же время, по сравнению с гидроусилителем, имеет ряд преимуществ:

- упрощенные настройки;
- адаптивность в компоновке;
- независимое от двигателя рулевое управление.

Предлагается реализация многоканального рулевого управления на базе электромеханического усилителя руля (ЭМУР). Анализ конструкции показал, что есть техническая возможность его преобразования в асинхронный сервопривод. Для этого следует ввести дополнительный блок управления, оснащенный группой датчиков контроля режима движения и позиционирования мобильного средства и также автономным задатчиком действия. Этот дополнительный надблок управления использует в своей работе сигналы серийных датчиков:

- крутящего момента;
- положения ротора;
- скорости мобильного средства.

Предлагаемая схема имеет вид:

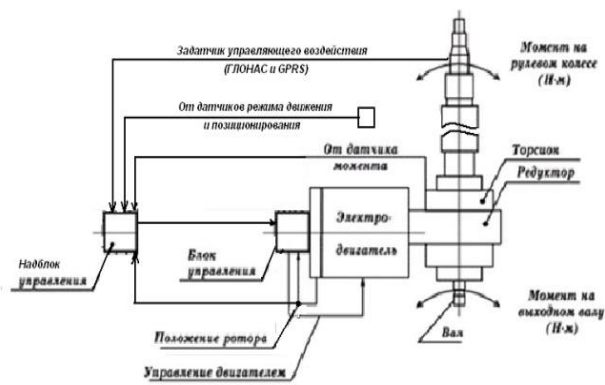


Рис. 8. Преобразованная схема сервопривода на базе ЭМУР

Fig. 8. Turbofan space-hydraulic steering with integrated servo drive

Использование ЭМУР как асинхронного сервопривода позволяет организовать две разновидности управления (с постоянной чувствительностью и по положению):

- "управление по проводам" (steer - by - wire) в случае разрыва кинематической связи между рулем и ЭМУР;

- тактильное управление (генерация подсказки в виде крутящего момента).

#### ВЫВОДЫ

1. Реализация управления с постоянной чувствительностью и по положению возможна на основе многоканальных систем управления. Предпочтительным является формирование комплексного управляющего сигнала, к стадии усиления и использования штатного усилителя в качестве сервопривода.

2. Использование ЭМУР по схеме сервопривода, в сочетании с надсистемой управления позволит значительно улучшить управляемость транспортных средств. Благодаря появлению современных электромеханических компонентов появилась реальная возможность для воплощения терранавигации уже завтра.

3. На порядок повышается точность отслеживания траектории:

- снижается время реакции водителя;
- возрастает устойчивость человека-машинной системы на повышенных скоростях

- при использовании автопилота во втором канале управления обеспечивается автовыход из заноса, что важно при движении по скользкой поверхности;

- использование принципа постоянной чувствительности рулевого управления обеспечивает одновременно устойчивость прямолинейного движения и маневренность мобильной машины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гельфенбейн С.П. 1981. Терранавигация.- Москва.: Наука, 207.
2. Петров В.А. 1989. Улучшение управляемости сельскохозяйственных МТА. - Москва, 178.

3. Подригало М.А., Волков В.П., Кирчатый В.И., Бобошко А.А. 2003. Маневренность и тормозные свойства колесных машин. / Под ред. М. А. Подригало. Харьков.: ХНАДУ, 403. (Украина).
4. Полишкевич О. 2012. Современное состояние парка кукурузоуборочных машин в условиях экономических и экологических ограничений. – Motrol, Vol. 14-№2. 91-96.
5. Бондаренко А., Грубань В. 2012. Современные аспекты повышения надежности кукурузоуборочных машин. - Motrol, Vol. 14-№2. 97-102.
6. Яковлев Б.Н., Любимов М.Е., Клочков В.Н., Склярова Т.В. 1999. Эргономика. – Саратов.: Саратов.гос.тех.ун-т, 92.
7. Лазуткина О.Е. 1992. Повышение производительности МТА на основе улучшения эргономических параметров поста управления оператора.- Харьков, 148.
8. Новикова Т.А. 1994. Гигиеническая и эргономическая оценка условий труда на мобильной сельскохозяйственной технике.- Саратов, 203.
9. Аствацатуров А.Е., Басилаи М.А. 2006. Инженерные методы безопасности систем «человек-техника-среда». - Ростов н/Д.: ДГТУ, 130.
10. Жалнин Э.В., Савченко А. Н. 1985. Технологии уборки зерновых комбайновыми агрегатами.- Москва: Россельхозиздат, 207.
11. Хачатрян Х.А. 1974. Стабильность работы почвообрабатывающих агрегатов.– Москва.: Машиностроение, 207.
12. Лурье А.Б. 1970. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. – Ленинград.: Колос, 376.
13. Африкян Р.М. 1970. Устойчивость движения и управляемость гусеничного тракторного агрегата при работе на террасах.- Ереван, 140с.
14. Лисютин В.П. 1988. Дифференциальная обработка междурядий. Тр. МИИСП. Т№3. Кукуруза и сорго. 23-29.
15. Широков А.П. 2006. Основы эргономики.- Хабаровск.: ДВГУПС, 117.
16. Петров В.О., Петров А.В., Лубяной М.М. 2008. Бюл.№17. Пат. 35247, МКИ<sup>7</sup> В62D1/18. Рулевое управление по положению гусеничным транспортным средством. (Украина).
17. Петров А.В. 2009. Внедрение управления «по положению» в конструкциях рулевых управлений мобильных машин. Вестник Днепропетровского Государственного Аграрного Университета. Т2. 271-273. (Украина).
18. Петров В.А., Лубяной Н.Н., Петров А.В., Бондарь А.Н.- № 200801763; заявл. 11.02.08; опубл. 25.07.08, Бюл. №14. Пат. 34001, МКИ<sup>7</sup> В62D1/18. Двухканальное рулевое управление транспортного средства с усилителем (Украина).
19. Петров В.А., Бондарь А.Н., Бондарь Н.С. и др. - №200503317; заявл. 04.11.05; опубл. 17.10.05, Бюл. №10. Пат. 9846, МКИ<sup>7</sup> В62D1/18. Рулевая колонка транспортного средства. (Украина).

20. Ходес И.В. 2005. Повышение технического уровня колесной машины на базе расчетно-теоретического обоснования параметров управляемости. - Волгоград: ВолгГТУ, 363.

#### WAYS OF IMPROVING THE QUALITY OF TRACKING THE MOVEMENT PATH OF MOBILE MACHINES

**Summary.** The paper is devoted to the studying of new types of directional control of mobile machines. The most promising solutions, which allow to receive a variable transfer steering ratio depending on the speed of the mobile machine are examined. The movement schemes of tracked and wheeled vehicles and mathematical description of this process are given. All the proposed circuits of steering drives are the most common at the moment. A number of constructive solutions to this type of steering drives for known types of chassis are given; moreover, it includes schemes for both light types of tractors (with no hydro amplifier) and heavy ones. The prospects of electromechanical amplifiers of steering (EMAS) and the possibility of their use as asynchronous servo drives are shown. For each design

solution there is a diagram of a detailed description of its actions and components. Such technical solutions have become necessary due to constant rising of technological rates of work. Carried investigating has shown the advantage of the proposed technical solutions over the traditional one, as a driver's velocity of reaction is decreased meanwhile the quality of tracing is risen. The work of a driver is analyzed from ergonomic point as well. Some of the main factors influencing driver's velocity of reaction especially on turning patches are the lengthwise speed on the mobile machine and the strength of the driver influence on the steering wheel. It has been settled that the driver's velocity of reaction depends on the machine speed, external factors (illumination, visibility, field pollution, operator's tiredness, curvature of patches) and is about 0,5 – 2,5 sec.

**Key words:** the human operator, object of control, volume-hydraulic steering (VHS), electromechanical amplifiers steering (EMAS), servo drives, quality of tracking the path of movement (quality of control).