

# ДОРОЖНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

## ROAD TESTS OF AN ELECTROMECHANICAL WHEEL TRACTOR MOTION CONTROL SYSTEM

**В.И. ПОДДУБНЫЙ**, д.т.н.  
**А.С. НЕНАЙДЕНКО**  
**Р.Р. БАЙБАСАРОВ**

Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, poddubny@list.ru

**V.I. PODDUBNY**, DSc in Engineering  
**A.S. NENAYDENKO**  
**R.R. BAYBASAROV**

Altai State Technical University, Barnaul, Russia,  
poddubny@list.ru

Одним из наиболее эффективных способов повышения производительности труда при выполнении сельскохозяйственных работ является внедрение систем точного земледелия. Важнейшим элементом таких систем являются подруливающие устройства и системы автопилотирования. В АлтГТУ им И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка системы управления движением для колесных сельскохозяйственных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем. Одним из наиболее важных этапов при этом является апробация данной системы в реальных дорожных условиях. На начальных этапах исследований была разработана структура программно-аппаратных средств электромеханической системы управления и проведены ее лабораторные испытания в режиме реального времени. В состав системы управления входят: бесколлекторный двигатель с блоком управления, устройство ЦАП/АЦП, навигационный приемник, датчик угла поворота управляемых колес и ПК с управляющей программой. Дорожные испытания системы управления были проведены на тракторе МТЗ-1221.2. Предварительно с помощью спутникового радионавигационного приемника ГЛОНАСС/GPS была записана требуемая траектория движения. Затем осуществлялось движение по задаваемой траектории с использованием разработанной электромеханической системы управления. Дорожные испытания подтвердили достаточно хорошую работоспособность разработанной системы. При движении по прямолинейной траектории со средней скоростью 1,5 м/с максимальная ошибка составила 0,23 м, среднее квадратичное отклонение – 0,09 м. При движении по криволинейной траектории со средней скоростью 1,3 м/с максимальная ошибка составила 0,61 м, среднее квадратичное отклонение – 0,27 м. В перспективе предполагается апробация разработанной электромеханической системы в реальных рабочих условиях при проведении полевых работ.

**Ключевые слова:** точное земледелие, электромеханическая система управления движением, колесная машина, дорожный эксперимент, спутниковые радионавигационные системы, трактор МТЗ-1221.2.

Precision farming systems implementation is one of the most efficient ways to increase labour productivity in agriculture. Key elements of such systems include auxiliary thrust devices and auto-piloting systems. Altai State Technical University specialists conduct researches to develop vehicle wheelbase motion control systems for farm vehicles featuring satellite radio navigation systems. One of the most important parts of those research projects takes place during system testing in real road conditions. At the initial stages of the research, the structure of the firmware of the electromechanical control system was developed and its laboratory testing was carried out in real time mode. The control system consists of: brushless motor with a control unit, DAC/ADC device, navigation receiver, steering angle sensor and PC with a control program. On-road test of the control system were on the tractor MTZ-1221.2. Required trajectories had been set up before the experiment with a radio navigation receiver GLONASS/GPS. After that, the vehicle was directed along the trajectories with an electromechanical control system. On-road tests have confirmed a reasonably good efficiency of the developed system. On a rectilinear trajectory, at an average speed of 1,5 m/s maximum error made 0,23 m, standard deviation made 0,09 m. On a curved trajectory, at an average speed of 1,3 m/s maximum error made 0,61 m, standard deviation made 0,27 m. In future it is planned testing of the developed electromechanical system under actual operating conditions during the field work.

**Keywords:** precision farming, electromechanical motion control system, wheeled machinery, on-road experiment, satellite radio navigation systems, tractor MTZ-1221.2.

## Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения производительности труда при выполнении сельскохозяйственных работ является внедрение систем точного земледелия, неотъемлемой частью которых являются системы параллельного и автоматического вождения. Данные устройства получили широкое распространение в Америке, Канаде, странах Западной Европы и с недавних пор активно внедряются на территории Российской Федерации. Применение систем точного земледелия позволяет существенно повысить экономическую эффективность использования сельскохозяйственных машин, что отмечается в множестве публикаций [1–4]. Однако следует отметить отсутствие на отечественном рынке систем подруливания и автопилотирования российского производства.

В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся экспериментальные исследования, целью которых являются разработка и создание отечественной системы параллельного вождения для управления движением колесных сельскохозяйственных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS и ее последующие апробация и внедрение в хозяйства региона. При этом очень важным является проведение дорожных и полевых испытаний на тракторе с целью выявления возможных конструктивных и программных недоработок.

## Цель исследования

Целью данной работы является проведение дорожных испытаний на тракторе МТЗ-1221.2 электромеханической системы управления движением колесной машины, разработанной и опробованной ранее в лабораторных условиях, проверка работоспособности системы в реальных условиях, выявление возможных конструктивных и программных недоработок.

## Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели необходимо адаптировать элементы электромеханической системы для трактора МТЗ-1221.2, провести экспериментальные исследования управляемого движения трактора по задаваемой траектории с использованием разработанной системы управления, провести анализ результатов эксперимента, оценить работоспособность системы управления и сделать соответствующие выводы.

## Структура электромеханической системы управления

При создании электромеханической системы управления были использованы следующие аппаратные средства (рис. 1):

- GNSS-приемник RTK Emlid Reach с возможностью работы в режиме RTK;
- бесколлекторный электродвигатель FL86BLS98 с блоком управления BLSD-50;
- двухканальный цифро-аналоговый (ЦАП) и аналого-цифровой (АЦП) преобразователь, интегрированные в одном физическом устройстве L-Card E14-140M;
- потенциометрический датчик угла поворота колес МУ-615;
- преобразователь напряжения для питания от электрической сети колесной машины;
- ПК с операционной системой семейства Windows и набором библиотек NET Framework 4.0 или выше.

Для удобства использования блок управления двигателем, устройство ЦАП/АЦП и преобразователь напряжения были интегрированы в один корпус (на рис. 1 – блок управления устройствами).

Кроме указанных выше устройств использовал сервис виртуальных базовых станций SmartNet для доступа к корректирующей информации с целью высокоточного определения текущего местоположения и скорости движения колесной машины. При этом доступ к сервису осуществлялся с ПК посредством интернет-соединения через USB-модем, в свою очередь поправки с ПК на GNSS-приемник передавались по Wi-Fi соединению.

Последовательность функционирования системы управления выглядит следующим образом. В управляющей программе задается траектория движения колесной машины. После начала движения система непрерывно с заданной частотой выполняет следующие действия:

- GNSS-приемник на основе корректирующей информации с базовой станции и собственных измерений вычисляет текущие координаты местонахождения колесной машины и проекции скоростей движения на неподвижные координатные оси;
- с датчика угла поворота колес считывается напряжение, соответствующее определенному углу;
- с управляющего блока электродвигателя считываются сигналы с датчиков Холла;

- напряжение с датчика угла поворота колес и сигналы с датчиков Холла поступают на АЦП, а оттуда передаются в управляющую программу на ПК;
- на основании полученных данных управляющая программа рассчитывает текущий угол поворота управляемых колес, направление вращения электродвигателя, вычисляет отклонение колесной машины от заданной траектории движения и определяет необходимый угол поворота колес, который требуется реализовать, чтобы обеспечить движение по необходимой траектории;
- исходя из величины требуемого угла поворота колес, на основании модернизированного алгоритма ПИД-регулирования определяются величина управляющего напряжения и необходимое направление вращения электродвигателя;
- эти значения передаются через ЦАП на блок управления двигателем, а оттуда для реализации – на сам электродвигатель.

### Дорожные испытания

Ранее разрабатываемая система управления прошла ряд успешных испытаний на экспериментальном стенде с использованием математического моделирования управляемого движения в режиме реального времени [5].

Во время моделирования реальная колесная машина заменялась ее математической моделью, полученной с использованием дифференциальных уравнений плоского движения [6], реально существовали только передняя подвеска и рулевой механизм автомобиля. В дальнейшем были проведены дорожные испытания на тракторе МТЗ-80.1 [7], в результате которых была установлена достаточно хорошая работоспособность системы управления при прямолинейной задаваемой траектории движения, но вследствие тугого рулевого управления и значительных люфтов рулевого колеса система не смогла обеспечить качественное движение по криволинейной траектории.

Дальнейшие испытания были продолжены на современном тракторе МТЗ-1221.2 с более легким рулевым управлением. Для этого был сконструирован новый кронштейн для крепления электродвигателя к рулевому колесу, а также модернизировано крепление датчика угла поворота колес для конкретной модели трактора.

Дорожный эксперимент проходил на базе учебно-опытной сельскохозяйственной станции Алтайского государственного аграрного университета. На рис. 2–4 представлен комплект используемого на эксперименте оборудования.

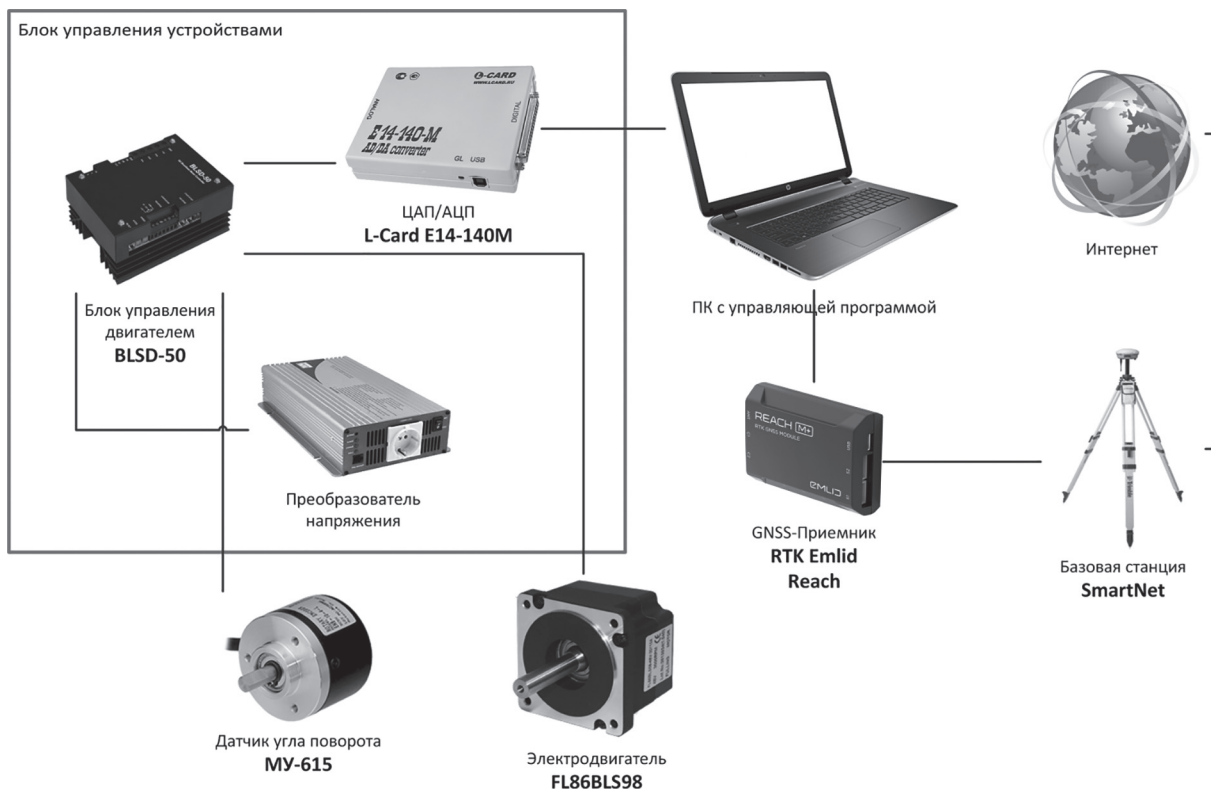


Рис. 1. Схема взаимодействия аппаратных частей системы управления



Рис. 2. Крепление управляющего электродвигателя к рулевому колесу



Рис. 3. Блок управления устройствами

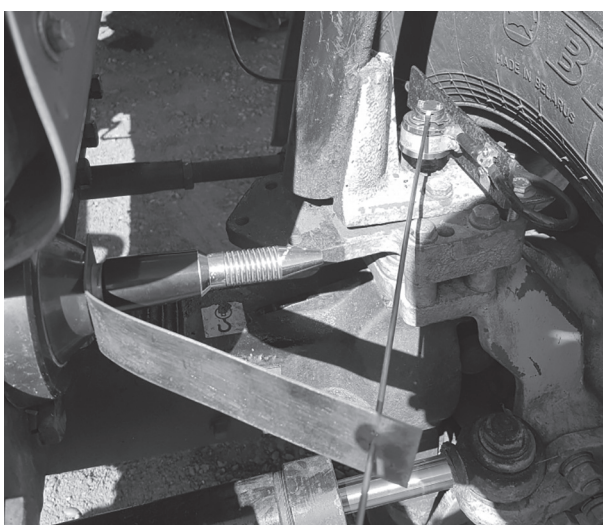


Рис. 4. Крепление датчика угла поворота управляемых колес

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Сначала водителю трактора предлагалось проехать по произвольной траектории. В это время происходила запись ко-

ординат траектории движения, формировался список базовых точек задаваемой траектории. Затем трактор возвращался в начальное положение, и задаваемая траектория должна была быть реализована с использованием разработанной электромеханической системы управления без вмешательства водителя в процесс управления.

### Результаты испытаний

Во время эксперимента осуществлялось управляемое движение по различным задаваемым траекториям. На рис. 5 представлены задаваемая и реализованная траектории при прямолинейном движении со средней скоростью трактора  $V_{\text{сред}} = 1,5 \text{ м/с}$ , временем прогноза  $t_{\text{прогноза}} = 1 \text{ с}$  и коэффициентом усиления  $k_{\text{усиления}} = 0,5$ . На рис. 6 приведены графики требуемого и действительного углов поворота управляемых колес при данном движении.

Максимальная ошибка в данном эксперименте составила  $E_{\text{max}} = 0,23 \text{ м}$ , среднее квадратичное отклонение –  $\sigma = 0,09 \text{ м}$ .

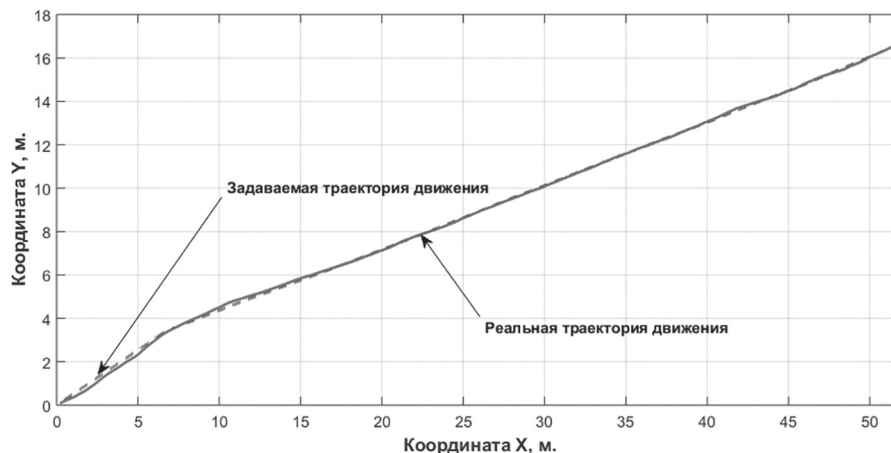


Рис. 5. Задаваемая и реализованная траектории при прямолинейном движении

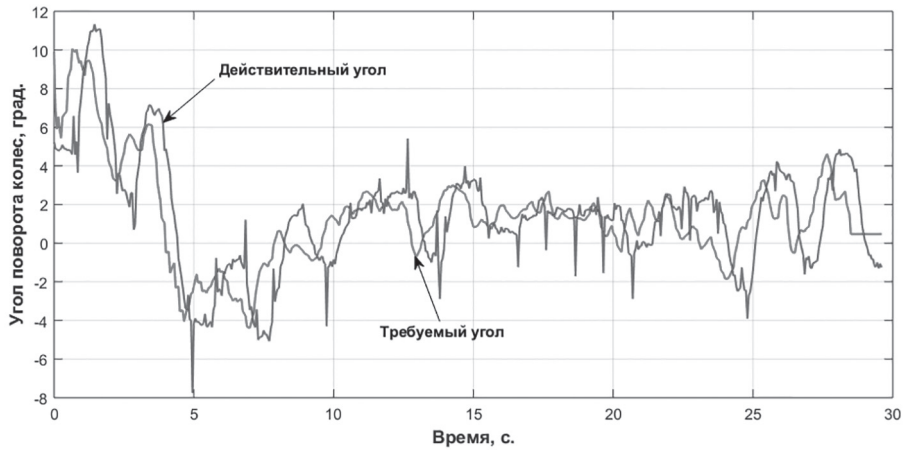


Рис. 6. Требуемый и действительный углы поворота управляемых колес при прямолинейном движении

На рис. 7 представлены задаваемая и реализованная траектории движения при криволинейном движении с  $V_{\text{сред}} = 1,3 \text{ м/с}$ ,  $t_{\text{прогноза}} = 1 \text{ с}$  и  $k_{\text{усиления}} = 0,5$ ; на рис. 8 – значения требуемого и дей-

ствительного углов поворота управляемых колес.

Максимальная ошибка при данном движении составила  $E_{\text{max}} = 0,61 \text{ м}$ , среднее квадратическое отклонение –  $\sigma = 0,27 \text{ м}$ .

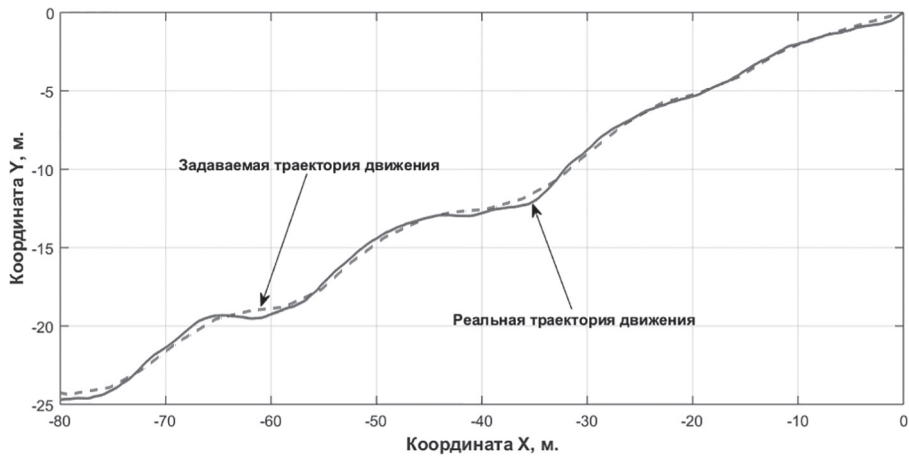


Рис. 7. Задаваемая и реализованная траектории при криволинейном движении

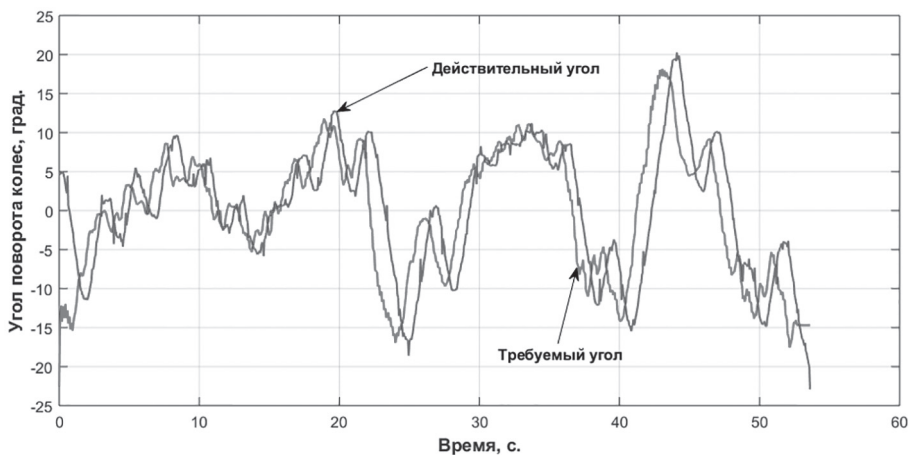


Рис. 8. Требуемый и действительный углы поворота управляемых колес при криволинейном движении

## Выводы

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о достаточно хорошем функционировании разработанной электромеханической системы управления движения в дорожных условиях. При задаваемом движении, близком к прямолинейному (именно оно является основным при выполнении сельскохозяйственных работ), отклонения от задаваемой траектории не превышают 0,2 м. Система также обеспечивает качественное движение по криволинейной траектории. В перспективе предполагается апробация разработанной электромеханической системы в реальных условиях при проведении полевых работ.

## Литература

- Игошин А.Н. Повышение экономической эффективности зернопроизводства путем внедрения системы точного земледелия в сельскохозяйственные организации Нижегородской области // Вестник НГИЭИ. 2012. № 5 (12). С. 39–45.
- Якушев В.П., Лekomцев П.В., Петрушин А.Ф. Точное земледелие: опыт применения и потенциал развития // Информация и космос. 2014. № 3. С. 50–56.
- Шаталина Л.П. Точное земледелие как один из путей к энергосбережению ресурсов в сельскохозяйственном производстве // АПК России. 2017. Т. 24. № 4. С. 949–953.
- Авдонина И.А. Точное земледелие – стратегия эффективного развития сельского хозяйства // Научный вестник Технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. 2015. № 14. С. 5–10.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 3. С. 32–38.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И. Математическое моделирование движения колесной машины в горизонтальной плоскости // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3 (138). С. 72–77.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Байбасаров Р.Р. Дорожные испытания системы управления движением колесной машины на тракторе МТЗ-80.1 // Вестник АГАУ. 2018. № 6. С. 156–160.

## References

- Igoshin A. N. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti zernoproizvodstva putem vnedreniya sistemy tochnogo zemledeliya v sel'skohozyajstvennye organizacii Nizhe-gorodskoj oblasti. Vestnik NGIEI. 2012. № 5 (12), pp. 39–45 (in Russ.).
- Yakushev V.P., Lekomcev P.V., Petrushin A.F. Tochnoe zemledelie: opyt prime-neniya i potencial razvitiya. Informaciya i kosmos. 2014. № 3, pp. 50–56 (in Russ.).
- Shatalina L.P. Tochnoe zemledelie kak odin iz putej k energosberezheniyu resursov v sel'skohozyajstvennom pro-izvodstve. APK Rossii. 2017. Vol. 24. № 4, pp. 949–953 (in Russ.).
- Avdonina I.A. Tochnoe zemledelie - strategiya effektivnogo razvitiya sel'skogo ho-zyajstva. Nauchnyj vestnik Tekhnologicheskogo instituta - filiala FGBOU VPO Ul'yanovskaya GSHA im. P.A. Stolypina. 2015. № 14, pp. 5–10 (in Russ.).
- Nenaydenko A.S., Poddubny V.I., Valekzhanin A.I. Modelirovanie upravleniya dvizheniem kolesnoj sel'sko-hozyajstvennoj mashiny v rezhime real'nogo vremeni. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. № 3, pp. 32–38 (in Russ.).
- Nenaydenko A.S., Poddubny V.I. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya ko-lesnoj mashiny v gorizontal'noj ploskosti. Vestnik KrasGAU. 2018. № 3 (138), pp. 72–77 (in Russ.).
- Nenaydenko A.S., Poddubny V.I., Baybasarov R.R. Dorozhnye ispytaniya sistemy upravleniya dvizheniem kolesnoj mashiny na traktore MTZ-80.1. Vestnik AGAU. 2018. № 6, pp. 156–160 (in Russ.).