



УДК 631.171



DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52

Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата

Яков Петрович Лобачевский,
член-корреспондент Российской академии наук,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник;
Сергей Эдуардович Лонин,
инженер, аспирант;
Илья Сергеевич Алексеев,
инженер, аспирант;

Николай Тимофеевич Гончаров,
специалист;
Ирина Ивановна Афонина,
старший научный сотрудник;
Екатерина Николаевна Ильченко,
инженер, e-mail: vim-avt@rambler.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Автоматизация сельскохозяйственной техники призвана решать конкретные практические задачи: контроль и поддержание качества выполнения технологического процесса, повышение производительности труда, увеличение урожайности сельскохозяйственных культур. Метод «точного земледелия» экономически целесообразен, так как способствует экономии технологического материала, снижению отрицательного воздействия на окружающую среду и производимую продукцию. (*Цель исследования*) Рассмотреть и проанализировать основные аспекты, необходимые при разработке алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного агрегата для пахотных работ. (*Материалы и методы*) Управление технологическим процессом включает руководство движением по заданной траектории, возможность изменения скорости движения в зависимости от загрузки двигателя, переключая передачу в трансмиссии. Физико-механические свойства агрегата существенно отличаются неоднородностью и зависят от погодных условий; алгоритм управления роботизированным мобильным агрегатом должен в максимальной степени учитывать вариации внешних воздействий сцепных свойств и сопротивлений движению в статусе случайных величин. (*Результаты и обсуждение*) Разработали имитационную модель, представляющую движение роботизированного агрегата. Выбрали циклическую траекторию перемещения агрегата, состоящую из двух видов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной траектории вокруг некоторого центра. (*Выводы*) Внедрение роботизированных технологий в земледелие повышает технические, технологические, производственно-экономические показатели сельскохозяйственных агрегатов при проведении полевых работ, увеличивает производительность труда, сокращает сроки проведения работ, способствует рациональному использованию биоэнергетических ресурсов, повышает урожайность и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: робот, роботизированная система, дистанционный контроль, программное обеспечение, автоматизация технологических процессов.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Лонин С.Э., Алексеев И.С., Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Ильченко Е.Н. Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №1. С. 48-52. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-1-48-52.

Development of Algorithms and Software Systems for Motion Control of a Robotic Tillage Unit

Yakov P. Lobachevsky,
corresponding member of the Russian Academy of
Sciences, Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;
Sergey E. Lonin,
engineer, post-graduate student;
Ilya S. Alekseev,
engineer, post-graduate student;

Nikolay T. Goncharov,
specialist;
Irina I. Afonina,
senior researcher;
Ekaterina N. Il'chenko,
engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation



Abstract. Automation of agricultural machinery is aimed at solving specific practical tasks: control and maintenance of the technological process quality, increasing labor productivity as well as crop yields. The method of "precision farming" is economically expedient, since it is a direct saving of technological material, as well as it helps reducing the negative impact on the environment and farm produce. (*Research purpose*) The research purpose is to review and analyze the main aspects required to develop the algorithms and software for motion control systems for a robotic tillage unit. (*Materials and methods*) To implement process control, it is necessary to control the direction of travel along a specified path, change the speed of movement depending on the engine load, switching the transmission gears. Physical-and-mechanical characteristics of the unit are rather heterogeneous and depend on weather conditions. Therefore, the algorithm for controlling the power of the robotic mobile unit must take into account, as much as possible, variations in the external effects of drawbar properties and the motion resistance, as a random factor. (*Results and discussion*) The authors have developed an imitation model representing the movement of a robotic unit. For the simulation, use has been made of a cyclic trajectory of the unit movement, consisting of two types of sections: the rectilinear ones reflecting the soil tillage pattern, and the turn areas where the unit makes a turn along a curvilinear trajectory around a certain center. (*Conclusions*) The implementation of robotic technologies in agricultural production result in increased technical, technological, production and economic indicators of agricultural units in field work, increased labor productivity, reduced time required for fieldworks, more rational use of bioenergy resources, increased yields of agricultural crops and reduced environmental impacts.

Keywords: robot, robotic system, remote control, software, automation of technological processes.

For citation: Lobachevskiy Ya.P., Lonin S.E., Alekseev I.S., Goncharov N.T., Afonina I.I., Il'chenko E.N. Razrabotka algoritmov i programmnoho obespecheniya sistem upravleniya dvizheniem robotizirovannogo agregata dlya pahotnyh rabot [Development of algorithms and software systems for motion control of a robotic tillage unit]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N6. 48-52. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-1-48-52 (In Russian).

Работа энергетического средства роботизированного агрегата, как и трактора, происходит при тесном взаимодействии с почвой (грунтом). Его физико-механические свойства проявляются в виде сцепных свойств движителей и в виде сопротивлений действию рабочих агрегатов машины-орудия, которые отличаются большим разнообразием. Алгоритм управления энергетическим средством роботизированного мобильного агрегата должен в максимальной степени учитывать вариации внешних воздействий сцепных свойств и сопротивлений движению как случайные [1]. В состав управления энергетическим средством должны быть включены соответствующие датчики. При пассивных рабочих органах, например, при первичной обработке почвы, затраты энергии на движение во многом зависят от глубины обработки почвы и степени смещения рабочего органа в сторону не вспаханного поля. Эти параметры необходимо включить в алгоритм управления энергетическим средством.

Таким образом, алгоритм управления роботизированным агрегатом должен:

- определить по навигатору свое местоположение (ширину, долготу, высоту), сравнить его с заданной траекторией движения, в случае отклонения вычислить расхождение и подать сигнал на рулевое управление для устранения несоответствий;
- управлять подъемом-опусканием рабочих органов пахотного агрегата в соответствии с заданными координатами;
- регулировать глубину пахоты в соответствии

с заданной программой по сигналам датчика глубины;

- измерять и регулировать скорость движения в соответствии с технологической нормой;
- не допускать пробуксовки движителей;
- измерять и регулировать тяговую нагрузку на энергетическое средство изменением передаточного отношения от первичного вала к вторичному;
- регулировать положение плуга в горизонтальной плоскости изменением частоты вращения одного или двух опорных приводных колес по сигналам датчиков давления полевой доски на край борозды;
- записывать на флеш-память и передавать диспетчеру местоположение агрегата и параметры технологического процесса.

Цель исследования – рассмотреть и проанализировать основные аспекты, необходимые при разработке алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного агрегата для пахотных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Принят за основу принцип приоритетности решения поставленных задач. Вначале решают задачу определения местоположения агрегата и соответствия его положения заданной траектории. Затем рассматривают задачу поддержания глубины вспашки, расхода топлива, скорости движения и т.д. [2]. Роботизированный агрегат – динамическая система, на которую действуют, с одной стороны, силы сопротивления движению, а с другой – движущая сила. Эти воздействия и вызывают изменения скорости агрегата:

$$\frac{d_v}{d_t} = \frac{P_K - \sum P_C}{m_{ar}} \quad (1)$$

где P_K – движущая сила агрегата;
 $\sum P_C$ – сумма всех сил сопротивления;
 m_{ar} – поступательно-движущая масса агрегата, приведенная к центру масс.

В случае разгона, торможения и изменения направления движения необходимо учитывать инерционность агрегата.

Уравнение для разгона и торможения агрегата имеет вид:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{T_V}} + V_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_V}} \right), \quad (2)$$

где $T_V = \frac{m_{ar}}{\frac{\partial \sum P_c}{\partial V} - \frac{\partial P_K}{\partial V}}$;

$V_0, V_{уст}$ – соответственно начальная и установившаяся скорость агрегата;

T_V – постоянная времени, характеризующая запаздывание отклонения скорости агрегата относительно отклонения сил сопротивления движению и движущих сил (зависит от агрегата, сил сопротивления и тяговых показателей).

При установившемся движении агрегата на гоне необходимо измерять действительную и теоретическую скорости движения.

Действительную скорость движения выдает навигатор. Теоретическую скорость измеряют по датчикам, регистрирующим частоту вращения ведущих колес. Измеряют путь, пройденный колесами за единицу времени. Из-за пробуксовки теоретическая скорость оказывается больше действительной. Когда эта величина больше 10-15%, то в алгоритме управления движением предусматривается включение переднего ведущего моста (при его наличии) или снижение скорости движения; если скорости вращения правого и левого колеса отличаются при движении на прямолинейном участке, то включается дифференциал [3].

При развороте агрегата управление осуществляется согласно структурной схеме (рис. 1).

При подходе к концу борозды по команде рабочие органы поднимаются. Затем рычагом переключения переходят на первую (пониженную) передачу и отслеживают выбранную траекторию поворота в зависимости от длины плуга, рассчитанную и проверенную ранее до выхода на следующий гон. Сверяют координаты и опускают рабочие органы [4].

Для моделирования выбрали цикличную траекторию перемещения агрегата, состоящую из двух видов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной

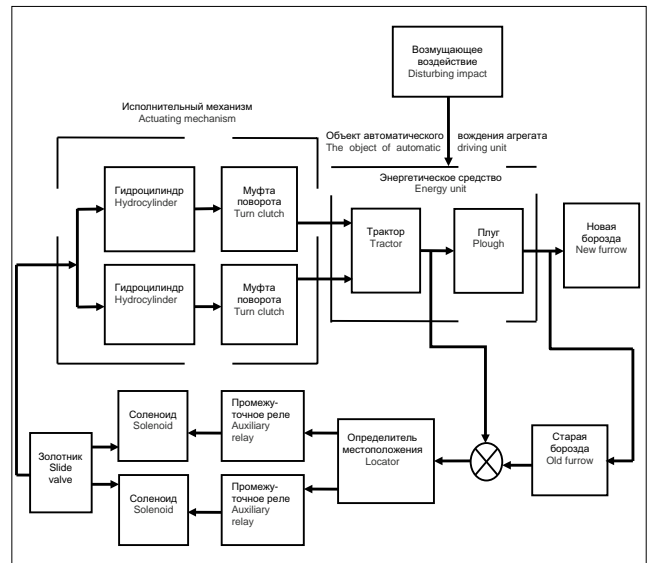


Рис.1. Структурная схема управления роботизированным агрегатом при разворотах

Fig. 1. Block diagram of the robotic unit controlling when making turns

траектории вокруг некоторого центра [5].

Траекторию и используемую площадь в создании подпрограммы рассчитывают по формулам: минимальный радиус поворота агрегата:

$$R_{min} = Lctga + B/2, \quad (3)$$

где L – продольная база трактора;
 α – угол поворота управляемых колес;
 B – расстояние между осями поворотных цапф колесного трактора.

Ширина поворотной полосы E_n и путь одного разворота S_x для петлевого поворота на 180°, соответственно, равны:

$$E_n = 2,8R + 0,5B_p; S_x = 6R + 2l.$$

Параметр l соответствует длине выезда агрегата до границы разворота и зависит от типа и конструкции орудий [6].

Для выполнения работ необходимо выбрать наиболее экономичный способ движения машинно-тракторного агрегата. Для этого используется оценочный показатель способа движения – коэффициент рабочих ходов $\varphi_{p,x}$, который определяется по формуле:

$$\varphi_{p,x} = \frac{\sum S_p}{\sum S_p + \sum S_x}, \quad (4)$$

где $\sum S_p$ – суммарная длина рабочих ходов, м; $\sum S_x$ – суммарная длина холостых ходов, м.

Суммарную длину рабочих ходов определяют по формуле:

$$\sum S_p = \frac{F}{B_{p,x}}, \quad (5)$$

где F – площадь обрабатываемого участка, м²; $B_{p,x}$ – расстояние между рабочими ходами, м.

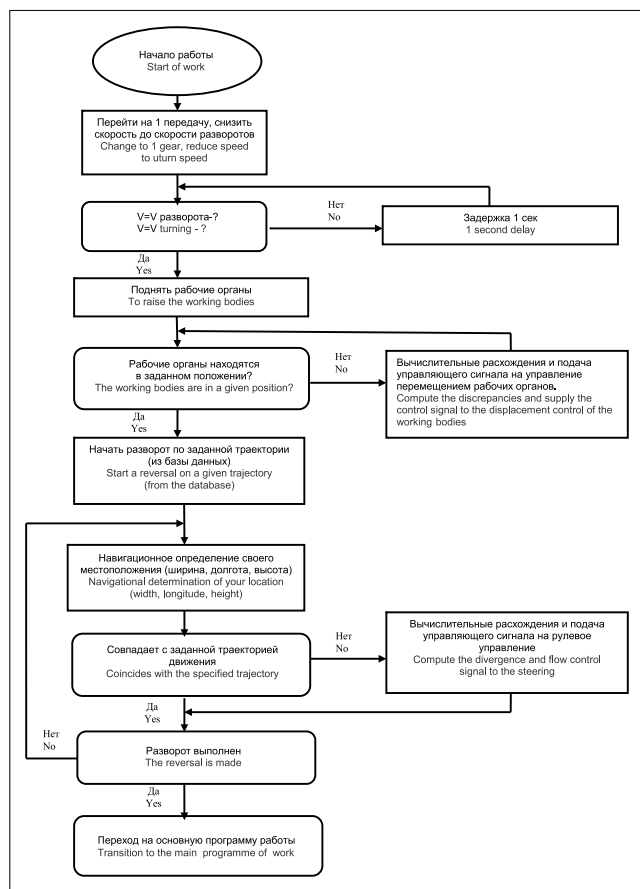


Рис. 2. Алгоритм управления роботизированным агрегатом при разворотах

Fig. 2. Control algorithm of the robotic unit when making turns

Суммарная длина холостых ходов определяется по следующей формуле:

$$\sum S_x = \sum S_{xi} \cdot n_i, \tag{6}$$

где $\sum S_{xi}$ – длина холостого хода при i -ом повороте, m ; n_i – количество i -ых поворотов.

При движении агрегата челночным способом коэффициент рабочего хода $\varphi_{p.x}$ рассчитывают по формуле:

$$\varphi_{p.x} = \frac{L_r}{L_r + 6R + 2l}. \tag{7}$$

Коэффициент $\varphi_{p.x}$ существенно зависит от длины гона L_r и ширины загонов C , на которые разделяют поле. Поэтому каждой длине гона должна соответствовать определенная оптимальная ширина загона, обеспечивающая наибольшую производительность агрегата [7].

Оптимальная ширина загона для движения всвал или вразвал:

$$C_{\text{опт}} = \sqrt{2(L_r \cdot B_p + 8 \cdot R^2)} \tag{8}$$

где L_r – длина гона; R – наименьший радиус поворота; B_p – рабочая ширина захвата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для обработки аналитических выкладок разработали подпрограмму, создающую имитационную модель движения роботизированного агрегата [8-10].

Программа показывает движение условной точки (агрегата) по траектории, состоящей из двух типов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной траектории вокруг некоторого центра.

Во время разворота программа не ведет подсчет пройденного пути. Только когда агрегат встанет на начало следующей полосы движения, по команде оператора продолжается подсчет пройденного пути и выполнение программы по внесению удобрений. Общая длина гонов поля 100 м разбита на 10 участков длиной по 10 м на каждом гоне при ширине участка 7,2 метра.

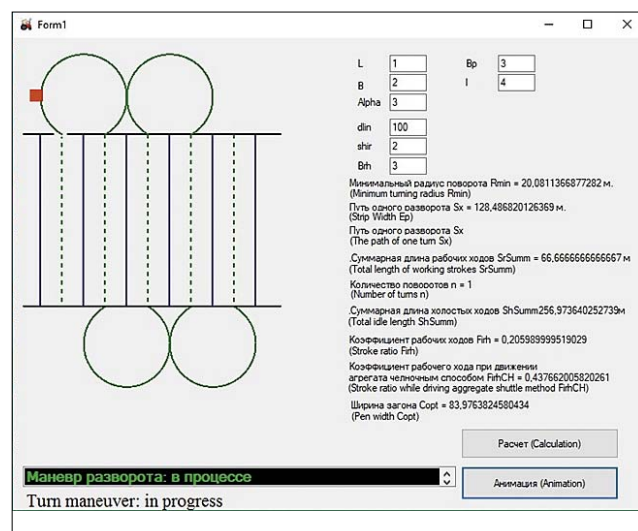


Рис. 3. Подпрограмма для создания имитационной модели движения роботизированного агрегата

Fig. 3. The subprogram to develop an imitating model of the robotic unit movement

Выводы. В настоящее время не существует какой-либо системы, надежно осуществляющей позиционирование и вождение сельскохозяйственного агрегата в различных условиях эксплуатации, что значительно усложняет программное обеспечение и снижает надежность и безопасность роботизированной технологии.

Мобильный роботизированный агрегат сельскохозяйственного назначения представляет собой автономное механизированное средство повышенной опасности. Поэтому требования к движению агрегата, самодиагностике энергетических, технологических и эксплуатационных параметров очень высокие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 15-20.
2. Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А. Робототехника и агрохимическое обеспечение растениеводства // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N9. С. 40-43.
3. Гончаров Н.Т., Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Афонина И.И., Лужнова Е.С., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Основные направления внедрения роботов в сельскохозяйственное производство России // *Автоматизация в промышленности*. 2017. N1. С. 38-40.
4. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С., Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Автоматизированные системы управления для оптимизации работы МТА // *Сельский механизатор*. 2017. N7. С. 14-16.
5. Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырев А.И. Многофункциональное робототехническое средство с системой технического зрения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2015. N4(14). С. 115-121.
6. Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Ключевые технологии и прогноз развития сельскохозяйственной робототехники // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. N6(21). С. 35-41.
7. Артюшин А.А., Смирнов И.Г. Научно-техническое обеспечение применения ГЛОНАСС в сельскохозяйственном производстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N1. С. 8-11.
8. Бейлис В.М. Общие технические и технологические требования к системе инновационных машинных технологий и техники // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N5. С. 49-52.
9. Grimstad L., Phan H.N.T., Pham C.D., Bjugstad N., From P.J. Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. Proc of the IROS Workshop on Agri-Food Robotics. 2015. October.
10. Rieder R., Pavan W., Maciel J.M.C., Fernandes J.M.C., Pinho M.S. A virtual reality system to monitor and control diseases in strawberry with drones: A project. Proc 7th Int Cong on Environ Model & Software. 2014. June. 919-926.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S. Upravlenie sel'skokhozyaystvennymi mobil'nymi agregatami s ispol'zovaniem navigatsionnoy sistemy GLONASS/GPS [Controlling agricultural mobile units with the GLONASS/GPS navigation system]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N3. 15-20 (In Russian).
2. Sychev V.G., Afanas'ev R.A., Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A. Robototekhnika i agrokhimicheskoe obespechenie rastenievodstva [Robotics and agrochemical support of crop production]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. N9. 40-43 (In Russian).
3. Goncharov N.T., Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Smirnov I.G., Afonina I.I., Luzhnova E.S., Alekseyev I.S., Lonin S.E. Osnovnyye napravleniya vnedreniya robotov v sel'skokhozyaystvennoye proizvodstvo Rossii [Main directions of introducing robots into Russian agricultural production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2017. N1. 38-40 (In Russian).
4. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S., Goncharov N.T., Afonina I.I., Alekseev I.S., Lonin S.E. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dlya optimizatsii raboty MTA [Automated control systems to optimize operation of a machine-tractor unit]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. N7. 14-16 (In Russian).
5. Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Mnogofunktsional'noe robototekhnicheskoe sredstvo s sistemoy tekhnicheskogo zreniya [Multifunctional robotic tool with a technical vision system]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015. N4(14). 115-121 (In Russian).
6. Godzhayev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Klyucheveye tekhnologii i prognoz razvitiya sel'skokhozyaystvennoy robototekhniki [Key technologies and the forecast of agricultural robotics development]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2016. N6(21). 35-41 (In Russian).
7. Artyushin A.A., Smirnov I.G. Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie primeneniya GLONASS v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Scientific and technical support of the GLONASS use in agricultural production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N1. 8-11 (In Russian).
8. Beylis V.M. Obshchie tekhnicheskyye i tekhnologicheskyye trebovaniya k sisteme innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki [General technical and technological requirements for the system of innovative engineering technology and machinery means]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. N5. 49-52 (In Russian).
9. Grimstad L., Phan H.N.T., Pham C.D., Bjugstad N., From P.J. Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. Proc of the IROS Workshop on Agri-Food Robotics. 2015. October (In English).
10. Rieder R., Pavan W., Maciel J.M.C., Fernandes J.M.C., Pinho M.S. A virtual reality system to monitor and control diseases in strawberry with drones: A project. Proc 7th Int Cong on Environ Model & Software. 2014. June. 919-926 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 04.03.2019

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья принята к публикации 05.04.2019
The paper was accepted
for publication on 05.04.2019