

Программируемый шахматный посев

Антон Юрьевич Попов,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: popov_a_ju@mail.ru

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Реферат. Один из вариантов решения задачи размещения растений с формой площади питания близкой к круговой – использование шахматного способа посева. Развитие точного земледелия и систем автоматизации создает предпосылки для программируемого шахматного посева на основе локального координирования посевного агрегата. (Цель исследования) Построить и проанализировать модели программируемого шахматного посева с применением алгоритма раздельного управления четными и нечетными посевными секциями с локальным координированием сеялки и элементов точного земледелия. (Материалы и методы) Для анализа алгоритма раздельного управления четными и нечетными секциями сеялки в программном комплексе Simulink Matlab построили имитационную модель шахматного посева с учетом следующих допущений: линии отсчета расстояний на противоположных краях поля параллельны, поверхность поля плоская, сопротивление воздуха не учитывается, скольжение или буксование путеизмерительного колеса отсутствует, семена падают в борозду с ускорением свободного падения и фиксируются в точке касания с почвой, скорость сеялки принимается переменной. (Результаты и обсуждение) Представили для визуализации работы алгоритма управления заслонками четных и нечетных секций сеялки график размещения семян относительно заданной позиции открытия заслонок в нескольких рядах посева. Определили аналитические зависимости для расчета смещений открытия заслонок посевных секций, которые используются в специальной программе для подбора оптимального числа импульсов энкодера. Установили, что это позволяет минимизировать значения смещения Δ_L на 1000 метров прохода ($\Delta_L = 8,48 \times 10^{-5} - 8,50 \times 10^{-5}$ метра) и обеспечивает точное координирование исполнительных механизмов сеялки на поле. (Выводы) Выявили, что увеличение скорости сеялки приводит к нарушению шахматной схемы размещения семян на поле из-за их разброса в борозде. Выяснили, что для снижения разброса семян в борозде и соблюдения шахматной схемы распределения необходимо модернизировать сошниковую систему пропашной сеялки или проводить посев при скорости ниже 2,5 метра в секунду, что негативно скажется на производительности посевного агрегата.

Ключевые слова: алгоритм управления, шахматный способ, энкодер, модель посева, разброс семян, неравномерность распределения.

Для цитирования: Попов А.Ю. Программируемый шахматный посев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. N2(39). С. 74-80. DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-2-74-80.

Programmable Chess Sowing

Anton Yu. Popov,

Ph.D.(Eng), associate professor, e-mail: popov_a_ju@mail.ru

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. One of the options for solving the problem of placing plants with the shape of the feeding area close to the circular one is to use a chess method of seeding. The development of precision farming and automation systems creates prerequisites for programmable chess seeding based on local coordination of the seeding unit. (Research purpose) The research purpose is in building and analyzing models of programmable chess seeding using an algorithm for separate control of even and odd seeding sections with local coordination of the seeder and precision farming elements. (Materials and methods) For the analysis of the algorithm separate control of odd and even partitions of seeders in the software package Matlab Simulink a simulation model of staggered planting was built based on the following assumptions: reference line distances on opposite edges of the field parallel to the surface field of the flat, air resistance is ignored,

sliding or slipping distance measuring wheel is not presented, the seeds are sown in the furrow with the free fall acceleration and fixed in the tangent point with the ground, the speed of a drill is variable. (Results and discussion) To visualize the operation of the algorithm for controlling the flaps of even and odd sections of the drill, the article presents a graph of the placement of seeds relative to the specified position of opening the flaps in several rows of seeding. Authors have described analytical dependencies for calculating the offset of opening the shutters of seed sections, which are used in a special program for selecting the optimal number of encoder pulses. It was found that this minimizes the values of the offset Δ_L per 1000 meters of passage ($\Delta_L = 8.48 \times 10^{-5} - 8.50 \times 10^{-5}$ meters) and ensures precise coordination of the seeder's actuators in the field. (Conclusions) It was found that an increase in the speed of the seeder leads to a violation of the chess scheme of placing seeds on the field due to their spread in the furrow. It was found that to reduce the spread of seeds in the furrow and comply with the staggered distribution scheme, it is necessary to upgrade the coulter system of the rowed seeder or to carry out sowing at a speed below 2.5 meters per second, which will negatively affect the productivity of the sowing unit.

Keyword: control algorithm, chess method, encoder, sowing model, seed variation, uneven distribution.

For citation: Popov A.Yu. Programmiruemyy shahmatnyy posev [Programmable chess sowing]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020. Vol. 67. N2(39). 74-80 (In Russian). DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-2-74-80.

Оптимальная форма площади питания растения – круговая, эквивалентная форме корневой системы [1]. Современная техника и технологии посева не обеспечивают оптимальное размещение семян пропашных культур на поле с круговой формой питания. Максимально близким способом для наилучшего размещения семян служит квадратно-гнездовой посев, который в современных технологиях возделывания не применяется и заменен на пунктирный [2]. Форма площади питания при пунктирном способе посева – прямоугольная с различным соотношением сторон, зависящим от ширины междурядья, шага посева в рядке, показателей качества дозирования высевających аппаратов и других регулировок пропашной сеялки.

Оптимальное расположение гнезд семян на поле остается актуальным вопросом. Один из вариантов решения задачи размещения растений с формой площади питания близкой к круговой – использование шахматного способа посева, когда семена высеваются на поле по вершинам равнобедренного или правильного треугольника. При этом семена и растения располагаются с площадью питания в виде правильного или вытянутого шестиугольника – наиболее близкого к форме круга. Посев в шахматном порядке при последующей культивации может быть обработан в трех направлениях – вдоль и поперек направления посева, а также по направлениям диагоналей поля. Это позволит повысить качество последующей междурядной обработки почвы при уходе за посевами, заключающееся в уменьшении на 11,5% площади необработанных площадок в форме шестиугольников при шахматном посеве по сравнению с необработанными квадратными площадками, остающимися при квадратном расположении гнезд семян (Патент № 104493 СССР. МПК А01 С7/18. Приспособление для осуществления шахматно-гнез-

дового способа посева к зерновым сеялкам / Б.Я. Антиликаторов и др.; заявитель и патентообладатель Б.Я. Антиликаторов. Заявл. № 453487 23.06.1955; опубл. 01.01.1956. 4 с.). Шахматное распределение семян на поле дает возможность отказаться или максимально уменьшить последующую обработку посевов гербицидами, а значит создаст предпосылки для получения экологически чистого урожая.

В связи с большой трудоемкостью и металлоемкостью, необходимостью использования мерной проволоки и натяжных станций, шахматный способ посева не получил практического применения. Но с развитием прецизионного земледелия, цифрового сельского хозяйства и систем автоматизации появляются технические предложения по осуществлению посевов сельскохозяйственных культур на основе глобальных систем определения положения, которые обеспечивали бы выявление местоположения посевного агрегата в режиме реального времени и последующее управление общим или индивидуальным приводом посевных секций в зависимости от ее текущих координат [3-9]. Это создает предпосылки для разработки алгоритмов управления исполнительными механизмами посевного агрегата и проведения программируемого шахматного посева без мерной проволоки для оптимального размещения семян на поле.

Цель исследования – построить и проанализировать модели программируемого шахматного посева с применением алгоритма раздельного управления четными и нечетными посевными секциями с локальным координированием сеялки и элементов точного земледелия.

Материалы и методы. Исходя из схемы шахматного посева (рис. 1), семена требуется размещать так, чтобы в двух смежных рядах они были смещены друг относительно друга на половину шага по-

сева $t/2$. Следовательно, возникает необходимость в раздельном управлении четными и нечетными секциями пропашной сеялки для дозирования семян. Для этого каждая секция сеялки оснащается исполнительными механизмами в виде заслонок, управление которыми организовано через микроконтроллер. Для координирования на поле сеялка оборудуется путеизмерительным колесом с энкодером и устройством навигации в виде GPS-приемника. Координаты линии отсчета формируются предварительно на основе электронной карты поля и загружаются в память микроконтроллера посевного агрегата (Патент № 2709967 РФ. МПК7 A01C7/18. Способ посева пропашных культур / А.Ю. Попов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ДГТУ. Заявл. № 2019125365 12.08.2019; опубл. 23.12.2019. Бюл. № 36. 9 с.).

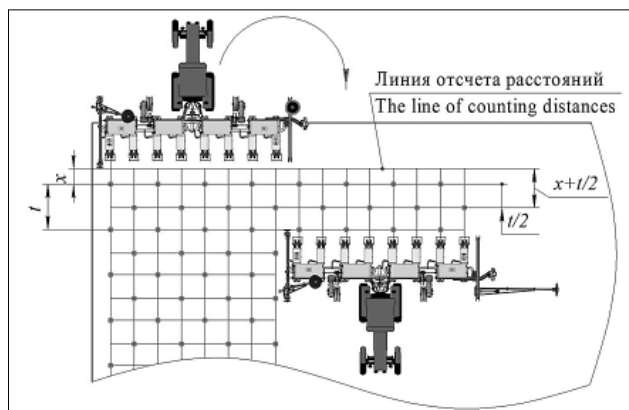


Рис. 1. Схема шахматного посева на поле
Fig. 1. Scheme of chess sowing on the field

Реализацию шахматного посева и алгоритм программы раздельного управления заслонками четных и нечетных секций сеялки представили на рисунке 2. Нумерация секций сеялки начинается слева по ходу движения сеялки.

Для анализа алгоритма раздельного управления четными и нечетными секциями сеялки в программном комплексе *Simulink Matlab* построили имитационную модель шахматного посева (рис. 3) с учетом следующих допущений: линии отсчета расстояний на противоположных краях поля параллельны, поверхность поля плоская, сопротивление воздуха не учитывается, скольжение или буксование путеизмерительного колеса отсутствует, семена падают в борозду с ускорением свободного падения и фиксируются в точке касания с почвой, скорость сеялки принимается переменной.

Рассмотрели основные части структурной схемы модели шахматного посева. Для моделирования переменной скорости сеялки использовали генератор случайных чисел в виде блока *Speed*, где задаются среднее значение и дисперсия скорости. Переменная скорость служит входным параметром для модели-

рования работы путеизмерительного колеса с установленным на его ось инкрементальным энкодером. Задача энкодера, задаваемого блоком *Incremental Shaft Encoder*, заключается в генерации дискретных сигналов в зависимости от пройденного расстояния сеялкой.

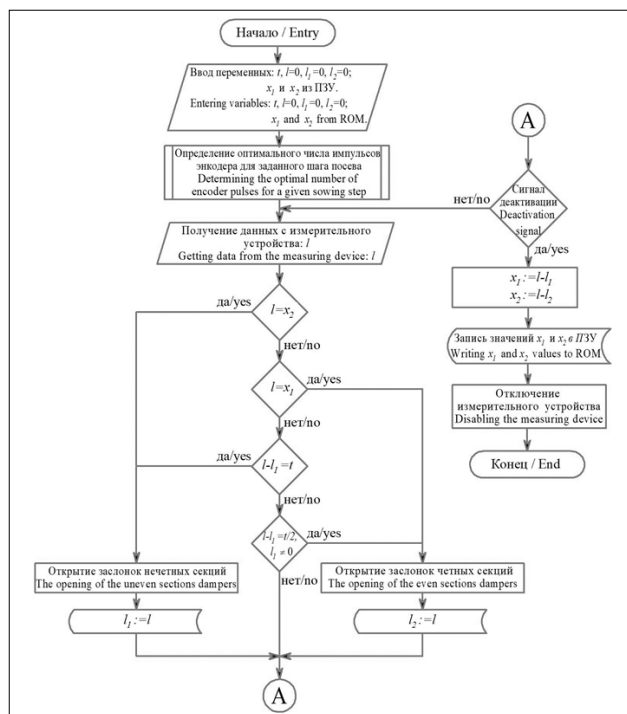


Рис. 2. Алгоритм раздельного управления четными и нечетными секциями сеялки
Fig. 2. Algorithm for separate control of even and odd sections of the seeder

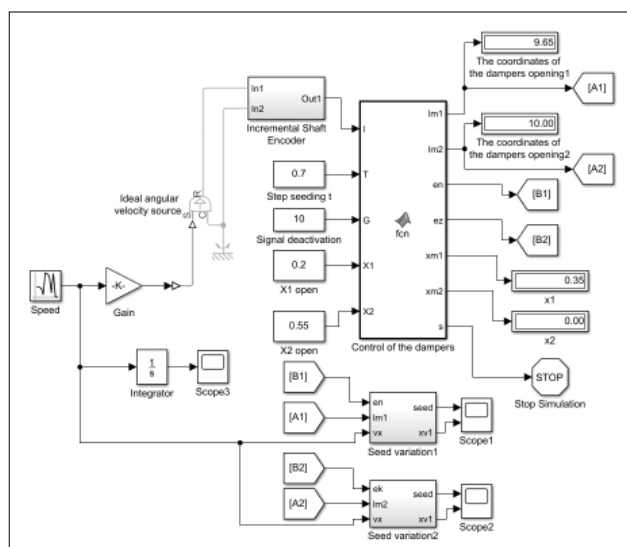


Рис. 3. Имитационная модель шахматного посева в Simulink Matlab
Fig. 3. Simulation model of chess sowing in Simulink Matlab

Для преобразования поступательной скорости сеялки в частоту вращения путеизмерительного колеса используется блок идеального источника угло-

вой скорости *Ideal angular velocity*. Но из-за дискретности энкодера при измерении пройденного расстояния будут возникать погрешности, связанные с необходимостью округления числа импульсов n_t , которое зависит от величины шага посева t :

$$n_t = \left\lceil \frac{n \cdot t}{2\pi \cdot R} \right\rceil, \quad (1)$$

где n – число импульсов энкодера за один оборот колеса, шт.; R – радиус колеса, м.

При вычислении выражения (1) число импульсов n_t округляется к ближайшему целому числу. При этом смещение от заданной позиции открытия заслонки Δ_t за один шаг посева t составит:

$$\Delta_t = t - n_t \cdot k_1, \quad (2)$$

где k_1 – путь, пройденный сеялкой за один сигнал энкодера, м;

Из выражений (1) и (2) следует, что смещение от заданной позиции открытия заслонки Δ_t с каждым пройденным шагом посева t будет накапливаться и в конце прохода сеялки составит максимальное смещение Δ_L , определяемое по формуле:

$$\Delta_L = \Delta_t \cdot \left[\frac{L}{t} \right], \quad (3)$$

где L – расстояние пройденного пути сеялкой за один проход, м.

При вычислении дроби в формуле (3) результат округляется к меньшему числу.

Таким образом, для каждого значения заданного шага посева t необходимо вычислять число импульсов энкодера n , которое позволит свести к минимуму смещения Δ_t и Δ_L . Для этого на этапе ввода исходных данных перед посевом по формулам (1)–(3) проводится программный поиск значений n .

Алгоритм раздельного управления заслонками четных и нечетных секций сеялки (рис. 2) реализован с помощью функционального блока *Control of the dampers*, который представляет собой подпрограмму на одноименном языке программирования среды *Matlab*. На вход блока *Control of the dampers* в виде постоянного сигнала подаются значения заданного шага посева t , координаты первого открытия заслонок нечетных x_1 и четных x_2 посевных секций сеялки, а также расстояние, на котором деактивируется измерительное устройство. На вход блока управления направляются сигналы с энкодера.

Из блока *Control of the dampers* выводятся дискретные сигналы управления заслонками посевных секций, а также значения расстояний от последнего срабатывания заслонок нечетных x_1 и четных x_2 посевных секций до линии отсчета расстояний в конце прохода сеялки. Значения сигналов x_1 и x_2 определяются в момент завершения расчета имитационной модели при подаче ненулевого сигнала на

блок *Stop* и служат координатами первого открытия заслонок на следующем проходе сеялки.

Для динамического моделирования разброса семян x_c в борозде по направлению движения сеялки относительно позиций открытия заслонок в структурную схему модели посева для четных и нечетных секций ввели субмодели *Seed variation*, реализующие в зависимости от изменения скорости сеялки расчет выражения [10]:

$$x_c = (v_c - v_{0x}) \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (4)$$

где v_c – скорость сеялки, м/с;

v_{0x} – начальная скорость семян относительно сеялки в момент их сброса, м/с;

h – высота падения семян, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

Расчет выражения (4) в субмоделях *Seed variation* осуществляется в момент регистрации положительных сигналов управления заслонками с выходных портов блока *Control of the dampers*.

Результаты и обсуждение. При численных расчетах модели посева строили совмещенные графики местоположения семян и координат открытия заслонок четных и нечетных посевных секций, один из которых представлен на рисунке 4. Из графика видно, что алгоритм раздельного управления открытием заслонок работает в соответствии с заданной схемой посева. Заслонки срабатывают на каждом шаге посева t в четных и нечетных рядах без пропусков. При этом наблюдается разброс семян в рядах, связанный с их инертностью и переменной скоростью сеялки.

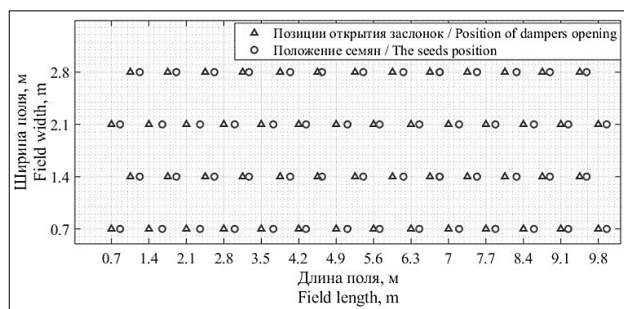


Рис. 4. Результат распределение семян на поле на первых 10 м прохода сеялки

Fig. 4. Seeds distribution on the field in the first 10 m of the seeder pass

На основе выражений (1)–(3) при помощи специальной программы провели предварительный подбор числа импульсов энкодера для ряда значений заданного шага посева и позиций открытия заслонок. Параметром оптимизации приняли смещение открытия заслонок на расстоянии 1000 м, которое должно быть минимальным. Результаты расчетов представили в таблице 1.

Table 1				Таблица 1
Результаты исследования влияния параметров настройки энкодера на максимальное смещение семян в рядке от позиции открытия заслонок				
Results of the influence of encoder settings on the maximum offset of seeds in a row from the position of dampers opening				
Шаг посева t , м Sowing step t , m	Оптимальное число импульсов энкодера n The optimal number of encoder pulses n	Позиция открытия заслонок x , м Position for dampers opening x , m	Ряд посева Row of sowing	Смещение открытия заслонки на 1000 м Δ_L , 10^{-5} м Bias of the damper opening by 1000 m Δ_L , 10^{-5} m
0,4	2982	0,00	1	8,48
		0,20	2	8,49
		0,15	1	8,49
		0,35	2	8,48
0,7	852	0,00	1	8,49
		0,35	2	8,50
		0,20	1	8,50
		0,55	2	8,48
0,9	994	0,00	1	8,49
		0,45	2	8,48
		0,15	1	8,49
		0,60	2	8,48

Из таблицы 1 видно, что абсолютные значения смещения на 1000 м прохода Δ_L при различных значениях шага посева t изменяются в узком диапазоне $8,48 \cdot 10^{-5} - 8,50 \cdot 10^{-5}$ м. Таким образом, программа подбора оптимального числа импульсов энкодера n обеспечивает достаточно точное координирование исполнительных механизмов на поле.

В таблице 2 представили результаты исследования влияния скорости сеялки на неравномерность разброса семян в борозде при шаге посева 0,7 м и позиции первого открытия заслонок $x = 0$ м.

Из таблицы 2 следует, что с увеличением скорости сеялки среднее значение разброса семян увеличивается от 0,063 до 0,253 м, среднеквадратическое

отклонение незначительно изменяется в пределах 0,030-0,033 м, а коэффициент вариации уменьшается с 51,9 до 12,4%.

Для четных и нечетных рядов посева данные статистические параметры отличаются несущественно. Размах разброса семян, равный разности максимального и минимального значений разброса, колеблется в пределах 0,179-0,217 м. Максимальное отклонение разброса семян также увеличивается с ростом скорости для нечетных рядов от 0,158 до 0,375 м, для четных – от 0,178 до 0,350 м. Вследствие разброса семян, повышение скорости сеялки будет приводить к нарушению шахматного расположения семян. При этом на скорости больше 3,0 м/с отклонение разме-

Table 2							Таблица 2
Статистические показатели неравномерности разброса семян в борозде							
Statistical parameters of irregular seeds variation in the furrow							
Средняя скорость сеялки v_c , м/с Mean seeder speed v_c , m/s	Ряд посева sowing row	Минимальное отклонение, м Minimum deviation, m	Максимальное отклонение, м Maximum deviation, m	Среднее значение разброса семян M , м Average value of seed dispersion M , m	Средне-квадратическое отклонение σ , м Standard deviation σ , m	Коэффициент вариации V , % Coefficient of variation V , %	
1,5	1	-0,038	0,158	0,063	0,032	50,3	
	2	-0,039	0,178	0,063	0,032	51,9	
2,0	1	0,014	0,192	0,111	0,032	29,0	
	2	0,014	0,228	0,111	0,033	30,5	
2,5	1	0,077	0,259	0,160	0,031	19,2	
	2	0,071	0,279	0,160	0,033	20,6	
3,0	1	0,124	0,324	0,207	0,031	14,9	
	2	0,122	0,301	0,207	0,030	14,7	
3,5	1	0,164	0,375	0,253	0,031	12,4	
	2	0,168	0,350	0,253	0,032	12,6	

шения семян в рядах посева будет сравнимо со значением половины заданного шага посева $t/2$.

Выводы. Построили имитационную модель шахматного посева с применением локального координирования сеялки на поле, которая учитывает переменную скорость сеялки, разброс семян в рядах посева, длину рабочего прохода сеялки, некратную заданному шагу посева. Представили для визуализации работы алгоритма управления заслонками четных и нечетных секций сеялки график размещения семян относительно заданной позиции открытия заслонок в нескольких рядах посева.

Определили аналитические зависимости для расчета смещений открытия заслонок посевных секций, которые используются в специальной программе для подбора оптимального числа импульсов энкодера. Установили, что это позволяет минимизировать значения смещения Δ_L на 1000 м прохода ($\Delta_L = 8,48 \cdot 10^{-5} - 8,50 \cdot 10^{-5}$ м) и обеспечивает точное координирование исполнительных механизмов сеялки на поле.

Выявили, что увеличение скорости сеялки приводит к нарушению шахматной схемы размещения семян на поле из-за их разброса в борозде. При шаге посева $t = 0,7$ м и средней скорости выше 3,0 м/с – средний разброс семян увеличивается от 0,207 до 0,253 м, максимальное отклонение увеличивается от 0,301 до 0,375 м, это приводит к значительному искажению схемы посева, что недопустимо. Выяснили, что для снижения разброса семян в борозде и соблюдения шахматной схемы распределения необходимо модернизировать сошниковую систему пропашной сеялки или проводить посев при скорости ниже 2,5 м/с, что негативно скажется на производительности посевного агрегата.

Библиографический список

1. Мухин В.А., Кромм А.А., Щукин С.Г. Влияние способов посева зерновых колосовых культур на площадь питания растений // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2005. N6(160). С. 71-79.
2. Василенко В.В., Василенко С.В. Распределение семян и растений сахарной свеклы при пунктирном высеве // *Техника в сельском хозяйстве*. 1999. N1. С. 6-9.
3. Смирнов И.Г., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Горшков Д.М. Дифференцированная обработка сельхозугодий с помощью БПЛА // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 30-35.
4. Михеев В.В., Еремин П.А., Аксенов А.Г., Сиберева А.В., Михеев В.С. К методике интеллектуализации производства пропашных культур // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 83-88.
5. Han X., Kim H., Jeon Ch., Moon H., Kim Ju., Yi S.

Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. 70-85.

6. Lu W., Zeng M., Wang L., Luo H., Mukherjee S., Huang X. et al. Navigation algorithm based on the boundary line of tillage soil combined with guided filtering and improved anti-noise morphology. *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 18. 3918.
7. Li Yu., Wang X., Liu D. 3D Autonomous Navigation Line Extraction for Field Roads Based on Binocular Vision. *Journal of Sensors*. 2019. 1-16.
8. Измайлов А.Ю., Личман Г.И., Марченко Н.М. Точное земледелие: проблемы и пути решения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. N5. С. 9-14.
9. Личман Г.И., Марченко Н.М. Космический мониторинг в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. N1. С. 27-31.
10. Зубрилина Е.М. Распределение семян двух культур в рядке при совместном высеве // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2002. N7. С. 13-15.

References

1. Mukhin V.A., Kromm A.A., Shchukin S.G. Vliyaniye sposobov poseva zernovykh kolosovykh kul'tur na ploshchad' pitaniya rasteniy [Effect of cereal spike crops sowing methods on the growing space of plants]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2005. N6(160). 71-79 (In Russian).
2. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V. Raspredeleniye semyan i rasteniy sakharnoy svekly pri punktirnom vyseve [Distribution of sugar beet seeds and plants in single-grain sowing]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 1999. N1. 6-9 (In Russian).
3. Smirnov I.G., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Gorshkov D.M. Differentsirovannaya obrabotka sel'khozugodiy s pomoshch'yu BPLA [Differential spraying of farmland via unmanned aerial vehicles]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 30-35 (In Russian).
4. Mikheev V.V., Eremin P.A., Aksenov A.G., Siberev A.V., Mikheev V.S. K metodike intellektualizatsii proizvodstva propashnykh kul'tur [The method of intellectualization of the row crops production]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 83-88 (In Russian).
5. Han X., Kim H., Jeon Ch., Moon H., Kim Ju., Yi S. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. 70-85.
6. Lu W., Zeng M., Wang L., Luo H., Mukherjee S., Huang X.

- et al. Navigation algorithm based on the boundary line of tillage soil combined with guided filtering and improved anti-noise morphology. *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 18. 3918.
7. Li Yu., Wang X., Liu D. 3D Autonomous Navigation Line Extraction for Field Roads Based on Binocular Vision. *Journal of Sensors*. 2019. 1-16.
 8. Izmaylov A.Yu., Lichman G.I., Marchenko N.M. Tochnoe zemledelie: problemy i puti resheniya [Precision agriculture: problems and solutions]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2010. N5. 9-14 (In Russian).
 9. Lichman G.I., Marchenko N.M. Kosmicheskiy monitoring v sisteme tochnogo zemledeliya [Space monitoring in the system of precision agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2010. N1. 27-31 (In Russian).
 10. Zubrilina E.M. Raspredelenie semyan dvukh kul'tur v ryadke pri sovmestnom vyseve [Distribution of seeds of two crops in a row at joint seeding]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2002. N7. 13-15 (In Russian).

Статья поступила в редакцию 11.03.2020

Статья принята к публикации 25.05.2020
