

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

ALGORITHM FOR MANAGING THE OPERATION MODES OF A MACHIN AND TRACTOR UNIT

С.В. КАЛАЧИН, д.т.н.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет имени
Н.П. Огарева», Саранск, Россия, s.v.kalachin@mail.ru

S.V. KALACHIN, DSc in Engineering

N.P.Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
s.v.kalachin@mail.ru

На современном этапе развития сельскохозяйственного производства на смену существующей сельскохозяйственной технике приходит новая, основанная на роботизации технологических процессов с элементами автономных систем принятия решений. Основу работы таких систем составляют алгоритмы управления, базирующиеся на технологиях построения математических моделей объекта управления с учетом закономерностей его функционирования. Целью представленного в статье исследования является разработка эффективного алгоритма управления режимами работы машинно-тракторного агрегата, основанного на высокопроизводительном методе эксплуатационного контроля. Решение поставленной задачи проведено на основе методов математического моделирования и программирования на языке Python. Контроль интенсивности изменения эксплуатационного параметра является самым высокоэффективным среди известных методов эксплуатационного контроля и его практическая реализация позволяет управлять режимами работы машинно-тракторного агрегата с прогнозированием (предвидением) по времени за счет выполнения упреждающих управляющих воздействий. Кроме того, алгоритм управления режимами работы машинно-тракторного агрегата на основе данного метода по временной сложности является наиболее предпочтительным по сравнению с аналогичными известными алгоритмами управления.

Ключевые слова: роботизация, цифровое земледелие, машинно-тракторный агрегат, алгоритм управления, эксплуатационный контроль, временная сложность.

At the present stage of development of agricultural production to replace the existing agricultural machinery comes new, based on robotization technological processes with elements of autonomous decision-making systems. The basis of which are the control algorithms, based on the technology of constructing mathematical models of the control object, taking into account its laws of functioning. The aim of the research presented in the article is to develop an efficient algorithm for controlling the operating modes of the machine and tractor unit based on the high-performance method of exploitative control. The solution of the problem is based on the methods of mathematical modeling and programming in the Python language. Control of the intensity of change in the operational parameter is the most highly effective among the known methods of exploitative control. The practical implementation of whom allows you to manage operation modes of the machine and tractor unit with prediction over time due to the implementation of preemptive control actions. In addition, the algorithm for controlling the modes of operation of the machine and tractor unit on the basis of this method, by time complexity, is the most preferable in comparison with similar known control algorithms.

Keywords: robotization, digital farming, machine and tractor unit, control algorithm, exploitative control, time complexity.

Введение

На современном этапе развития сельскохозяйственного производства на смену существующей сельскохозяйственной технике, где уже, начиная с 2010 года, в качестве стандартного оборудования применяются разнообразные бортовые системы контроля и управления, приходит новая, основанная на роботизации технологических процессов с элементами автономных систем принятия решений. Основу работы таких систем составляют алгоритмы обработки данных (алгоритмы управления), базирующиеся на технологиях построения математических моделей объекта управления с учетом его системных связей, структурных особенностей и закономерностей функционирования [1–7].

Основой алгоритмов управления режимами работы машинно-тракторного агрегата (МТА) являются методы контроля эксплуатационных параметров. Согласно проведенным нами исследованиям, развитие методов эксплуатационного контроля на различных этапах формирования сельскохозяйственного производства, на наш взгляд, можно распределить на несколько направлений (табл.).

Анализ представленных материалов показывает, что для решения задач следующего этапа развития сельскохозяйственного производства (Сельское хозяйство 4.0 – «Цифровое земледелие» [8]), могут быть использованы алгоритмы, основанные на контроле текущих значений и интенсивности изменения эксплуатационного параметра.

Соответственно возникает вопрос: какой из вышеперечисленных методов эксплуатационного контроля необходимо использовать для разработки алгоритма управления режимами работы МТА и как он повлияет на производительность роботизированной системы управления?

Цель исследования

Целью представленного в статье исследования является разработка эффективного алгоритма управления режимами работы МТА, основанного на высокопроизводительном методе эксплуатационного контроля.

Методы исследования

Согласно проведенным нами исследованиям [9], установлено, что контроль интенсивности изменения эксплуатационного параметра является самым высокоэффективным среди известных методов эксплуатационного контроля. Его практическая реализация позволяет:

- управлять режимами работы МТА с предвидением (прогнозированием) по времени за счет осуществления упреждающих управляющих воздействий (рис. 1);
- устранить возникновение ошибочных изменений режимов работы МТА;
- снизить суммарное время, требуемое для принятия решения по управлению МТА;
- устранить необоснованные и скрытые простои МТА;
- приблизить эффективность деятельности человека-оператора к эффективности работы технических звеньев в процессе управления МТА.

Расход топлива является наиболее подходящим контролируемым параметром, отражающим режимы работы МТА, для осуществления эксплуатационного контроля с предвидением по времени. На рис. 2 представлена общая структурная схема алгоритма управления режимами работы МТА.

В блоках 1–3 представленного на рис. 2 алгоритма управления осуществляется определение текущих значений G_{mi} , измерение суммарного значения ΣG_m и определение интенсивности изменения G_{mi} расхода топлива.

Таблица

Формирование методов эксплуатационного контроля режимов работы МТА

Методы эксплуатационного контроля	Этап развития сельскохозяйственного производства
Субъективный контроль – на слух, по дымности выхлопа и т.д.	Сельское хозяйство 1.0 – Трудоемкая система сельского хозяйства с низкой производительностью [8]
Допусковый контроль – по среднему значению контролируемого параметра	Сельское хозяйство 2.0 – «Зеленая революция» [8]
Допусковый контроль текущего значения контролируемого параметра	Сельское хозяйство 3.0 – «Точное земледелие» [8]
Допусковый и измерительный контроль интенсивности изменения контролируемого параметра	Сельское хозяйство 3.0 – «Точное земледелие» [8]

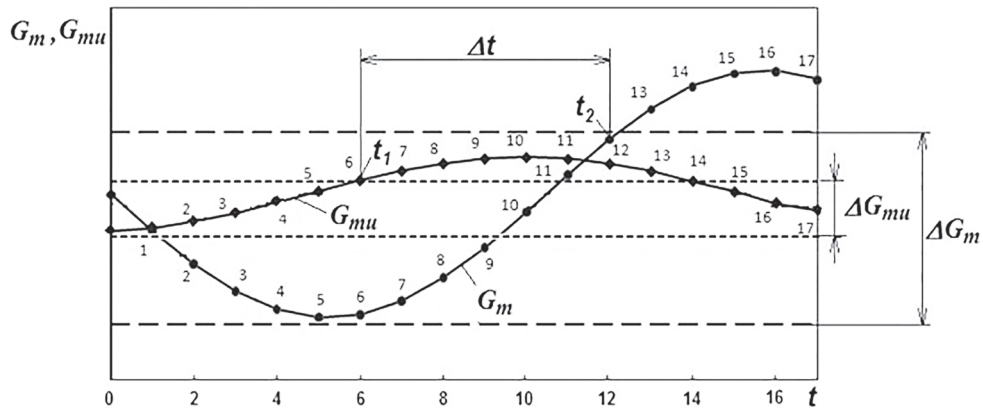


Рис. 1. Схема методов контроля режимов работы МТА:

t_1 – выход значений интенсивности изменения расхода топлива G_{mi} за границу установочного допуска ΔG_{mi} (научно-обоснованного предельного отклонения от номинального значения);
 t_2 – выход текущих значений расхода топлива G_m за границу установочного допуска ΔG_m ;
 $\Delta t = t_2 - t_1$ – резерв времени для ожидающего изменения режима работы МТА

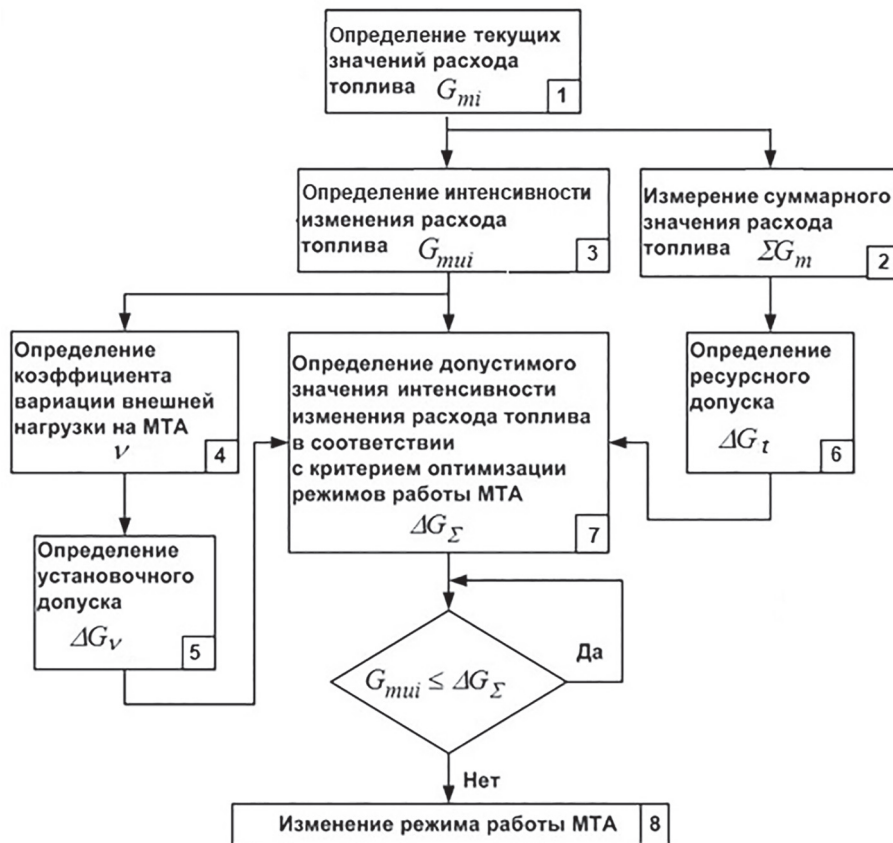


Рис. 2. Структурная схема алгоритма управления режимами работы МТА

Текущие значения расхода топлива двигателя определяются на основе математической модели прогнозирования [10]:

$$G_{m1}(M_{\Sigma}) = A_{\Sigma g1} + B_{\Sigma g1}M_{\Sigma} + [W(p)_{Gm} + C_{\Sigma g1}]M_{\Sigma}^2$$

при $M_{\Sigma} < M_H$;

$$G_{m2}(M_{\Sigma}) = A_{\Sigma g2} + B_{\Sigma g2}M_{\Sigma} + [W(p)_{Gm} + C_{\Sigma g2}]M_{\Sigma}^2$$

$$M_{\Sigma} \geq M_H, \quad (1)$$

где M_{Σ} – входное суммарное воздействие, приведенное к коленчатому валу двигателя; M_H – номинальный крутящий момент двигателя; $W(p)_{Gm}$ – параметр, характеризующий неустановившийся режим работы МТА; $A_{\Sigma g1}$, $A_{\Sigma g2}$, $B_{\Sigma g1}$, $B_{\Sigma g2}$, $C_{\Sigma g1}$, $C_{\Sigma g2}$ – коэффициенты характеристики двигателя $G_m(M_{\Sigma})$ соответственно на регуляторном $G_{m1}(M_{\Sigma})$ и корректорном $G_{m2}(M_{\Sigma})$ участках.

Интенсивность изменения расхода топлива определяется путем дифференцирования текущих значений, полученных на основе выражения (1).

Кроме того, интенсивность изменения расхода топлива $G_{mu}(M_\Sigma)$ соответственно для регуляторного $G_{mu1}(M_\Sigma)$ и корректорного $G_{mu2}(M_\Sigma)$ режимов работы двигателя можно определить на основе математической модели, разработанной нами по результатам научных исследований [10]:

$$G_{mu1}(M_\Sigma) = A_{\Sigma g1} + B_{\Sigma g1} M_\Sigma$$

при $M_\Sigma < M_n$;

$$G_{mu2}(M_\Sigma) = A_{\Sigma g2} + B_{\Sigma g2} M_\Sigma$$

при $M_\Sigma \geq M_n$, (2)

где $A_{\Sigma g1} = B_{\Sigma g1}$; $A_{\Sigma g2} = B_{\Sigma g2}$; $B_{\Sigma g1} = 2[W(p)_{Gm} + C_{g1}]$; $B_{\Sigma g2} = 2[W(p)_{Gm} + C_{g2}]$.

Выражения (1) и (2) представляют собой основу для разработки алгоритмов управления режимами работы МТА.

В блоке 4 (рис. 2) определяется текущее значение коэффициента вариации v внешней нагрузки.

В блоке 5 (рис. 2) определяется установочный допуск ΔG_v на величину которого постоянно в соответствии с условиями эксплуатации МТА корректируется нижняя граница допуска ΔG_Σ . Количественное значение ΔG_v определяется из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta G_v = G_{mn} - [W(p)_{Gm} (\bar{M}_\Sigma^2 + \sigma_\Sigma^2)] - 0,5[A_{\Sigma g1} + \\ + A_{\Sigma g2} + \bar{M}_\Sigma (B_{\Sigma g1} + B_{\Sigma g2})] + (\pi)^{-1}[A_{\Sigma g1} - A_{\Sigma g2} + \\ + \bar{M}_\Sigma (B_{\Sigma g1} - B_{\Sigma g2}) + \bar{M}_\Sigma^2 (C_{\Sigma g1} - C_{\Sigma g2})] \times \\ \times \arcsin[(M_n - \bar{M}_\Sigma) / A_\Sigma] - (\pi)^{-1}[B_{\Sigma g1} - B_{\Sigma g2} + \\ + \bar{M}_\Sigma (C_{\Sigma g1} - C_{\Sigma g2})] \sqrt{A_\Sigma^2 - (M_n - \bar{M}_\Sigma)^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_Σ , $\bar{M}_\Sigma$, σ_Σ – амплитуда колебаний, среднее значение и среднее квадратическое отклонение M_Σ ; G_{mn} – расход топлива на номинальном режиме работы двигателя.

В блоке 6 (рис. 2) определяется значение ресурсного допуска ΔG_t , на величину которого корректируется верхняя граница допуска ΔG_Σ . Количественное значение ΔG_t определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta G_t = G_{mn} - [W(p)_{Gm} \bar{T}] + 0,5(A_{gt} + B_{gt} \bar{T}) - \\ - (A_{gt} + B_{gt} \bar{T}) \Phi(T) + B_{gt} \sigma_t \varphi(T), \end{aligned} \quad (4)$$

где T – наработка МТА; $\bar{T}$, σ_t – среднее значение и среднее квадратическое отклонение наработки; $\Phi(T)$, $\varphi(T)$ – функция и плотность распределения наработки для закона Гаусса [11]; A_{gt} , B_{gt} – коэффициенты функциональной зависимости расхода топлива в функции наработки.

В блоке 7 (рис. 2) устанавливается допустимое значение для интенсивности изменения расхода топлива ΔG_Σ . Сравниваются значения G_{mu} с границами допуска ΔG_Σ . Изменение режима работы МТА выполняется, если текущее значение G_{mu} выходит за пределы допуска ΔG_Σ (блок 8).

Анализ результатов

Оценка алгоритмов может быть проведена по различным критериям, но чаще всего интересуют временная сложность, то есть порядок роста временных затрат на их выполнение [12]. Поэтому далее проведем сравнительный анализ вышеописанных алгоритмов управления режимами работы МТА, основанных на выражениях (1) и (2), по их временной сложности. Для этого разработаны программы на языке программирования Python с использованием модуля *timeit* [13–15], пример кода и результат выполнения которых представлен на Листинг_1 и Листинг_2 (рис. 3). Вычислительный эксперимент для рассматриваемых алгоритмов управления рассматривается на примере математических моделей (1) и (2) для регуляторного участка характеристики двигателя СМД-62 трактора Т-150К вблизи номинальной загрузки.

Анализ представленных результатов (Листинг_1) показывает, что порядок роста временных затрат при определении интенсивности изменения расхода топлива на основе выражения (1) будет на 12,4 % выше, чем при определении текущих значений расхода топлива. Операции дифференцирования и умножения, наряду с операцией возведения в степень, одни из самых медленных в электронно-вычислительных машинах (ЭВМ). Поэтому, с позиции временной сложности, представленный алгоритм на основе выражения (1) является неудачным.

Алгоритм на основе математической модели (2) (Листинг_2) позволяет освободиться от операций возведения в степень и дифференцирования, что, согласно представленным результатам, позволяет снизить временные

```

# Листинг_1. Алгоритм управления – математическая модель (1)

from timeit import default_timer as timer
start1= timer()
a=[round((0.219+0.0000054*i+0.000028*i**2),2) for i in range(500,550,1)] # Определение
# текущих значений расхода топлива
end1=timer()
b=[a[i]-a[i-1] for i in range(len(a))] # Определение интенсивности изменения
# расхода топлива
end2 = timer()
print("Time1:", round(end1-start1,7))
print("Time2:", round(end2-start1,7))

>>>Time1: 0.0002053 # Время(с) определения текущих значений расхода топлива
>>>Time2: 0.0002343 # Время(с) определения интенсивности изменения расхода топлива

# Листинг_2. Алгоритм управления – математическая модель (2)

from timeit import default_timer as timer
start1= timer()
b=[round((0.0000054+0.000056*i),2) for i in range(500,550,1)] # Определение
# интенсивности изменения расхода топлива
end1=timer()
print("Time:", round(end1-start1,7))

>>>Time: 0.0001397 # Время(с) определения интенсивности изменения расхода топлива

```

Рис. 3. Измерение времени выполнения программного кода

затраты при определении интенсивности изменения значений расхода топлива на 40,4 %, по сравнению с алгоритмом Листинг_1. Кроме того, структурная схема алгоритма управления режимами работы МТА, представленная на рис. 2, может быть сокращена на один (первый) блок, так как операция определения текущих значений расхода топлива не предусмотрена для алгоритма, основанного на определении интенсивности изменения эксплуатационного параметра (Листинг_2).

Выводы

1. Контроль интенсивности изменения эксплуатационного параметра является самым высокоэффективным среди известных методов эксплуатационного контроля. Практическая реализация такого контроля позволяет управлять режимами работы машинно-тракторного агрегата с прогнозированием (предвидением) по времени за счет выполнения упреждающих управляющих воздействий.

2. Применение математической модели прогнозирования изменения интенсивности текущих значений расхода топлива позволяет сократить количество медленных вычислительных операций и оптимизировать структурную схему алгоритма управления режимами работы МТА. Это позволяет снизить временные затраты на выполнение алгоритма на 40,4 %, по сравнению с известными аналогами.

3. Разработанный алгоритм управления (на основе контроля интенсивности изменения эксплуатационного параметра) по временной сложности является наиболее эффективным по сравнению с аналогичными известными решениями и поэтому наиболее предпочтительным при разработке роботизированных систем управления режимами работы МТА.

Литература

1. Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А. Робототехника и агрохимическое обеспечение растениеводства // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 9. С. 40–43.
2. Грязнов Н.А., Лопота А.В., Соснов Е.Н. Современные тенденции развития робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. № 2 (15). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2017. С. 4–11.
3. Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л. Перспективные направления роботизации точного земледелия // Робототехника и техническая кибернетика. № 1 (14). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2017. С. 27–32.
4. Очиров Н.Г., Эвиев В.А., Беляева Б.И., Хулхачиева С.Д. Алгоритм расчета математической модели эксплуатационных показателей МТА в среде MAPLE // Вестник аграрной науки Дона. 2017. Т. 3. № 39. С. 55–63.
5. Jabborov N.I., Eviev V.A., Belyaeva B.I., Ochirov N.G. Estimation of operation efficiency of

machin-tractor units equipped with constant power engines // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2015. Vol. 6. № 1. P. 1793–1802.

6. Vieira A.W., Drews P., Campos M. Efficient change detection in 3d environment for autonomous surveillance robots based on implicit volume // The 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (ICRA'12), 2012. P. 2999–3004.
7. Drews-Jr P., Rocha R., Campos M., Dias J. Fast and adaptive 3D change detection algorithm for autonomous robots based on Gaussian mixture Models // In International Conference on Robotic and Automation, ICRA, 2013. P. 4670–4675.
8. Беленков А.И. Цифровое земледелие // Нивы России. 2017. № 10. С. 52–58.
9. Калачин С.В. Контроль эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 144 с.
10. Калачин С.В. Оптимизация режимов работы машинно-тракторного агрегата на основе непрерывного контроля интенсивности изменения его эксплуатационных параметров: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Саранск, 2011. 34 с.
11. Калачин С.В. Прогнозирование эксплуатационных параметров МТА с учетом его технического состояния // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 7. С. 30.
12. Стивенс Р. Алгоритмы: Теория и практическое применение. М.: Изд-во «Э», 2016. 544 с.
13. Калачин С.В. Повышение производительности роботизированных систем управления мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Нива Поволжья. 2018. № 2 (47). С. 118–122.
14. Lutz M. Learning Python 5th Edition, O'Reilly Media. Inc, 2013. 1600 p.
15. Lutz M. Programming Python 4th Edition, O'Reilly Media. Inc, 2014. 1628 p.
4. Ochirov N.G., Eviev V.A., Belyaeva B.I., Khulkhacheva S. D. Algorithm for calculating the mathematical model of operational parameters of MTA in MAPLE software. Bulletin of Agrarian Science of the Don. 2017. Vol. 3. № 39, pp. 55–63 (in Russ.).
5. Jabborov N.I., Eviev V.A., Belyaeva B.I., Ochirov N.G. Estimation of operation efficiency of machin-tractor units equipped with constant power engines // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2015. Vol. 6. № 1, pp. 1793–1802.
6. Vieira A.W., Drews P., Campos M. Efficient change detection in 3d environment for autonomous surveillance robots based on implicit volume // The 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (ICRA № 12), 2012, pp. 2999–3004.
7. Drews-Jr P., Rocha R., Campos M., Dias J. Fast and adaptive 3D change detection algorithm for autonomous robots based on Gaussian mixture Models // In International Conference on Robotic and Automation, ICRA, 2013, pp. 4670–4675.
8. Belenkov A.I. Digital Farming. Niva of Russia. 2017. № 10, pp. 52–58 (in Russ.).
9. Kalachin S.V. Performance monitoring of functioning of the machine and tractor unit [Performance monitoring of operation of the machine and tractor unit]. Saransk: Publishing house of the Mordovian university, 2009. 144 p.
10. Kalachin S.V. Optimization of operating modes of the machine and tractor units on the basis of continuous monitoring of changes in the intensity of its operating parameters: Abstract. Dis. ... Dr. Technical Science [Optimization of operating modes of the machine and tractor units on the basis of continuous monitoring of changes in the intensity of its operating parameters: Abstract for Dissertation for Degree of Dr.Eng.]. Saransk, 2011. 34 p.
11. Kalachin S.V. Forecasting of the machine and tractor unit operational parameters taking into account its technical condition. Tractors and farm machinery. 2008. № 7, pp. 30 (in Russ.).
12. Stevens R. Algorithmy: Teoriya i prakticheskoe primenenie [Algorithms: Theory and practical application]. Moscow: Publishing house «E», 2016. 544 p.
13. Kalachin S.V. Improving the performance of robotic control systems for mobile agricultural units. Niva Povolzhya. 2018. № 2 (47), pp. 118–122 (in Russ.).
14. Lutz M. Learning Python 5th Edition, O'Reilly Media. Inc, 2013. 1600 p.
15. Lutz M. Programming Python 4th Edition, O'Reilly Media. Inc, 2014. 1628 p.

References

1. Sychev V.G., Afanas'ev R.A., Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A. Robotics technology and agrochemical support of plant cultivation. Tractors and farm machinery. 2016. No 9, pp. 40–43 (in Russ.).
2. Gryaznov N. A., Lopota A.V., Sosnov E. N. Modern trends in the development of robotics. Robotics and technical cybernetics. № 2 (15). St. Petersburg. 2017, pp. 4–11 (in Russ.).
3. Afanasiev R.A., Ermolov I.L. Perspective directions of robotization of precision farming. Robotics and technical cybernetics. № 1 (14). St. Petersburg. 2017, pp. 27–32 (in Russ.).