

УДК 630\*231.331:631.158:007.52

**ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПОСАДОК  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР.  
АКТУАЛЬНОСТЬ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ**

**Хамуков Ю.Х., Каноклова М.А.**

*ФГБУН Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр  
Российской академии наук», Нальчик, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

Одной из важнейших составляющих роботизации жизнедеятельности человека и общества в целом является, наряду с цифровизацией жизнедеятельности, обеспечение глобальных перемещений рабочих органов или, иными словами, обеспечение мобильности роботов. Таким образом, начавшийся переход цивилизации в эпоху тотальной роботизации связан с разработкой высокоподвижных и полностью управляемых транспортных платформ для мобильной робототехники различного назначения. Значительную долю таких изделий составят транспортные платформы для перемещения сельскохозяйственной робототехники, выполняющей производственные операции в особо сложных условиях – с передвижениями по рыхлым грунтам с высокой липкостью и жесткими ограничениями в маневрировании. В работе представлены результаты исследования возможностей и перспектив роботизации междурядной обработки посадок пропашных культур. Актуальность работы обусловлена тем, что экологические проблемы и ускоряющиеся процессы деградации сельскохозяйственных угодий требуют внедрения новых агротехнических приемов и технологий обработки посадок сельскохозяйственных культур. Негативное воздействие на сельхозугодья в наибольших масштабах возникает в виде машинной деградации, ухудшения химических и структурных характеристик и биологической активности почв от многочисленных проходов тяжелой техники, регулярного применения синтетических удобрений и пестицидов. В то же время именно обработка междурядий вносит основной вклад в деградацию угодий вследствие ее многократности и применения все более мощной техники. Снижать количество обработки междурядий не позволяют ограничения применения пестицидов и непрерывный рост приспособленности сельхозвредителей различного вида и сорной растительности к способам борьбы с ними. Повысить качество обработки междурядий без многочисленных проходов техники может роботизация производственных операций. При этом смысл понятия «роботизация» не вполне определен, а долговременные последствия широкомасштабной роботизации растениеводства не исследованы с позиций воздействия роботизации на экосистемный биогеоценоз.

**Ключевые слова:** растениеводство, агротехника, междурядная обработка, транспортная платформа, подвижность, роботизация, энергоэффективность, избирательное воздействие

**PROBLEMS OF LANDING PROCESSING ROBOTIZATION CROPS.  
RELEVANCE AND CONCEPTUAL LIMITATIONS.**

**Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A.**

*Federal Scientific Center “Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”,  
Nalchik, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

One of the most important components of the robotization of human life and society as a whole is, along with the digitalization of life, ensuring global movements of working bodies, or, in other words, ensuring the mobility of robots. Thus, the beginning of the transition of civilization to the era of total robotization is associated with the development of highly mobile and fully controlled transport platforms for mobile robotics for various purposes. A significant proportion of such products will be transport platforms for moving agricultural robotics that perform production operations in particularly difficult conditions – with movements on loose soils with high stickiness and severe restrictions on maneuvering. The paper presents the results of a study of the possibilities and prospects of robotization of inter-row cultivation of tilled crops. The relevance of the work is due to the fact that environmental problems and the accelerating processes of degradation of agricultural land require the introduction of new agricultural practices and technologies for processing crops. The negative impact on agricultural land on the largest scale occurs in the form of machine degradation, deterioration of the chemical and structural characteristics and biological activity of soils from numerous passages of heavy equipment, regular use of synthetic fertilizers and pesticides. At the same time, it is the cultivation of row spacing that makes the main contribution to the degradation of lands due to its repetition and the use of more and more powerful equipment. Limiting the use of pesticides and the continuous growth of the adaptability of agricultural pests of various types and weeds to methods of dealing with them do not allow reducing the amount of processing between rows. Robotization of production operations can improve the quality of row-spacing without numerous passes of equipment. At the same time, the meaning of the concept of “robotics” is not fully defined, and the long-term consequences of large-scale robotization of crop production have not been studied from the standpoint of the impact of robotization on ecosystem biogeocenosis.

**Keywords:** crop production, agricultural technology, inter-row cultivation, transport platform, mobility, robotization, energy efficiency, selective impact

В настоящее время относительно обоснованные надежды на сохранение плодородия сельхозугодий связаны с переходом к бесхимическим и не разрушающим струк-

туру почвы агротехнологиям в растениеводстве. Но переход на такие технологии сопряжен с необходимостью выполнениякратно большего количества двигательных

действий воздействующих на почву и растения рабочих органов и таким же значительным ростом требований к кинематическим и динамическим характеристикам этих действий. В настоящее время эти задачи решаются за счет усложнения и удорожания техники для обработки посадок традиционными рабочими органами. По мере усложнения применяемых в сельскохозяйственной отрасли технических средств и систем все острее проявляются ограничения в способности человека к управлению энергонасыщенными машинно-тракторными агрегатами с большими захватами и на высоких скоростях движения.

Следующим этапом механизации выполнения кинематически и динамически сложных двигательных действий по обработке почвы и растений в междурядьях является роботизация производственных операций в виде перехода на безлюдную технологию. Для достижения необходимого кратного снижения количества проходов техники по междурядьям роботизация должна обеспечивать соответствующее кратное повышение качества обработки почвы и растений.

Для этого роботизированный агрегат для междурядной обработки посадок должен обладать, во-первых, способностью безошибочного распознавания культурных растений и их вегетативных элементов. Во-вторых, способностью определять признаки поражения культурных и сорных растений болезнями. В-третьих, распознавать признаки наличия в посадках насекомых-вредителей и определять их количество. В-четвертых, определять вид сорных растений для выбора способа их удаления из междурядья. Затем следует способность управления усложнившимися кинематическими и динамическими действиями с рабочими органами для воздействия на почву и растения.

В данной работе оцениваются перспективы роботизации производства растениеводческой продукции в части возделывания пропашных культур. Наш подход основан на разделении задачи роботизации производственных процессов в растениеводстве на решение задачи алгоритмизации действий агротехнического робототехнического устройства, и на решение кинематических и динамических задач осуществления взаимодействия робототехнического устройства с почвой и растениями. Конкретно рассмотрены физико-технические ограничения на эксплуатационные харак-

теристики автономной мобильной агротехнической робототехники для междурядной обработки посадок.

#### *Ограничительные характеристики робототехнического агрегата*

Прежде всего, отметим, что в настоящее время определение «робот для междурядной обработки посадок» наиболее часто подразумевает, в сущности, традиционный агрегат для сплошной обработки посадок культиваторами и/или пестицидами, установленный в виде навесного оборудования на несущую транспортную платформу с автопилотом вместо механизатора. Подобный агрегат в лучшем случае является таким же тяжелым, как и обычные культиваторы на пилотируемой механизатором платформе. Соответственно, он вызывает такую же, а зачастую еще большую машинную деградацию почвы. Для существенного уменьшения деградации почвы необходимо использовать новые технологии и рабочие органы, основанные на иных физических принципах воздействия на почву и растения и позволяющие существенно (множественно!) снизить массу агрегатов. Особенно новые технологии обработки востребованы при возделывании пропашных культур, сопровождающемся наиболее интенсивными эрозийными процессами из-за многочисленности проходов агрегатов по полю. Также новые технологии должны быть малоэнерго- и малоресурсоемкими для достижения ощутимого экономического эффекта применения новой достаточно дорогостоящей роботизированной техники.

Наглядные ориентиры в оценке энергоемкости производственных операций представлены в таблице из «Методических указаний» курса лекций «Механизация производственных процессов в растениеводстве и их оптимальное проектирование» [1].

Таблица составлена по результатам практических полевых работ и позволяет сопоставлять сведения о трудо- и энергозатратах на выполнение отдельных операций и объективно отражает трудоемкость различных этапов возделывания подсолнечника. Из таблицы удалены столбцы с указанием длительности выполнения этапов возделывания с нормативными сроками и почасовым расчетом выполнения при различных продолжительностях рабочего дня и количества смен. Оставлены только столбцы со сведениями, необходимыми нам для общих оценок трудоемкости операций и этапов.

Виды работ и нормативы расходов топлива при возделывании подсолнечника

Шифр работ	Наименование сельхозработ	Исходные требования	Продолжительность рабочего дня, ч	Количество смен за сутки	Состав агрегата	Количество обслуживающего персонала, чел.	Норма выработки агрегата за 7 ч, га/т	Норма расхода топлива, кг/га, кг/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Лушение стерни дисковое (га)	0,05–0,07 м	14	2	К-3180-Catros	1	55	2,1
2	Лушение стерни лемешное (га)	0,14–0,16 м	21	3	К-3180+ППЛ-10-25	1	9,1	12,2
3	Транспортировка и внесение минеральных удобрений (т)	0,23 т/га	7	1	МТЗ-920+ЗА-М900	1	95	2,2
4	Погрузка органических удобрений (т)	20 т/га	10	1,4	К-3180+ПНУ-800	1	800	0,48
5	Внесение органических удобрений (т)	20 т/га	10	1,4	К-3180+МТУ-15	1	750	0,2
6	Вспашка на глубину 28–30 см	0,28–0,3 м	21	3	К-3180+RT-100	1	11,2	15,0
7	Разделка пласта пахоты (га)			25.09	К-3180-Catros	1	55	2,1
8	Сплошная культивация (га)	0,10–0,12 м		01.04	К-3180+КШУ-12	1	70	2,9
9	Сплошная культивация (га)	0,06–0,08 м		10.04	К-3180+КШУ-12	1	70	3,2
10	Сплошная культивация (га)	0,06–0,08 м		20.04	К-3180+КШУ-12	1	70	3,2
11	Посев подсолнечника (га)			20.04	К-3180+Kinze-3600	1+1	43,8	4,1
12	Прикатывание посевов (га)			21.04	К-3180+КЗК-10	1	2,3	2,3
13	Боронование до всходов (га)			26.04	К-3180+БЗШ-21+ШБ-2,5	1	1,5	1,5
14	Боронование после всходов (га)			10.05	К-3180+БЗШ-21+ШБ-2,5	1	1,5	1,5
15	Первая междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м		15.05	К-3180+КРН-8,4	1	3,4	3,4
16	Вторая междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м	250 га	25.05	К-3180+КРН-8,4	1	3,4	3,4
17	Третья междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м		10.06	К-3180+КРН-8,4	1	32,6	3,4
18	Уборка подсолнечника (га)	2 т/га		20.09	TORUM-740	1	36,12	9,8
19	Транспортировка семян (т)	Т		20.09	К-3180+НПБ-20	1	90 т	0,8
20	Транспортировка измельченных корзинок (т)	т/га		20.09	МТЗ-920+ПСЕ+-12,5	1	26	2,3
21	Скирдование измельченных корзинок (т)	т/га		20.9	МТЗ-920ПКУ-0,8	1	42,0	0,8

В частности, на подготовку пашни потребовались операции сплошной обработки почвы с общим расходом топлива 18,28 кг/га,

на предпосевную культивацию – 9,3 кг/га, на посев и послепосевную обработку – 9,4 кг/га, или более 390 МДж.

Далее последовали междурядные операции – на три междурядные культивации потребовалось топлива 10,2 кг/га, или почти 430 МДж. Соответственно, роботизированный агрегат сравнимой производительности – около 3 га за час работы – должен развивать мощность не более 0,36 МВт, чтобы его энергопотребление не превысило энергопотребление традиционного «пилотируемого» агрегата.

В первом приближении (принимая энергоэффективность самого культиватора за 100%), коэффициент полезного действия (КПД) культивации как тяговый КПД трактора можно рассчитать как [2–4]:

$$\eta_{\text{тяг}} = \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\delta} \times \eta_{\text{т}}$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  – КПД с учетом механических потерь в трансмиссии;  $\eta_{\delta}$  – КПД с учетом потерь на буксование ведущих колес;  $\eta_{\text{т}}$  – КПД с учетом потерь на качение трактора.

Величина механического КПД  $\eta_{\text{тр}}$  современных тракторных трансмиссий шестеренного типа при близких к расчетным величинам нагрузках равна 0,88–0,93.

КПД буксования  $\eta_{\delta}$  учитывает потери мощности за счет снижения скорости из-за буксования движителей трактора и при возможности пренебречь кинематическим несоответствием в работе движителей определяется по формуле

$$\eta_{\delta} = v/v_{\text{т}} = 1 - \delta,$$

где  $v/v_{\text{т}}$  – отношение реальной поступательной скорости движителя к расчетной,  $\delta$  – коэффициент буксования. Коэффициент буксования зависит от нагрузки на крюке трактора и от свойств почвы, но на практике ограничен допустимым значением, равным для гусеничных тракторов 0,05, а для колесных с двумя ведущими колесами – 0,18. Для полноприводных четырехколесных тракторов коэффициент буксования ограничен значением 0,15.

При работе в тяговом режиме на стерне колосовых для колесных тракторов  $\eta_{\text{т}}$  принимают равным 0,88, а для гусеничных тракторов  $\eta_{\text{т}} = 0,92$ . Окончательно верхний предел значения КПД трактора в системе обрабатываемая почва – трактор примерно равен 0,69 [5].

С учетом КПД двигателей тракторов примерно 33%, получим результирующий КПД трактора с ДВС не более 23%.

Соответственно, робототехнический агрегат для междурядной обработки почвы и растений с такой же производительностью, как существующие традиционные

агрегаты, должен обладать способностью приложить к выполнению полезной работы мощность около 0,083 МВт.

Таким образом, если при выполнении этого ограничительного требования тяговый КПД транспортной платформы робототехнического агрегата будет выше 23%, роботизация междурядной обработки будет способствовать снижению ее энергоемкости. Отметим, что одной из наиболее трудоемких для возделывания культур является картофель. Затраты труда на производство 1 ц картофеля составляют примерно 3,5 чел.ч. Наиболее трудоемкими процессами являются подготовка семян к посадке и уборка. Также возделывание картофеля связано с многочисленными обработками плантаций из-за высокой чувствительности картофеля к недостатку любого микроэлемента, высокой поражаемости посадок картофеля различными инфекционными (грибными, бактериальными, вирусными, нематодными и др.) и неинфекционными болезнями и большого количества – более 60 видов насекомых, слизней, грызунов и т.п. вредителей.

#### *Глобальные ограничивающие факторы*

Для обоснования дальнейших выводов и предложений совершим небольшое отступление в область глобальных процессов эволюции агроэкосистем.

Мировой опыт развития производства сельскохозяйственной, в частности растениеводческой, продукции свидетельствует о том, что современное сельское хозяйство развивается в условиях обостряющегося противоречия между необходимостью выполнения многочисленных проходов тяжелой агротехники для ухода за посадками и применения пестицидов, с одной стороны, и неизбежной деградацией почвы и отравления ее пестицидами, с другой [6–8]. За последние двести-триста лет развитие производства растениеводческой продукции методом интенсификации производственных процессов средствами механизации традиционных приемов воздействия на почву и растения привело к возникновению глобальных угроз среде обитания человека. В качестве способа выхода из кризисной ситуации все с большей надеждой рассматривается роботизация производственных процессов. Но здесь человечество столкнулось с парадоксом. Суть его в том, что роботизация отрасли невозможна без того, чтобы роботизация приводила к осязаемой экономической эффективности. А экономическая

эффективность формируется из снижения себестоимости продукции и/или повышения ее качества. Вследствие этого роботизация воспринимается как осуществление банальной конъюнктурной политики в расчете на экономический эффект от замещения человека с его рабочими орудиями и приемами выполнения производственных операций на работа с теми же орудиями и приемами. Но опыт стран с передовой наукой и технологиями, предпринимающих попытки реализации национальных программ роботизации с подобными целями и задачами, свидетельствует о том, что она приводит к росту ресурсо- и энергопотребления и, естественно, не сопровождается возникновением экономического эффекта. Мы считаем, что это обусловлено не слабостью реализуемых в агротехнологиях инженерных решений, а в том, что традиционные приемы и средства выполнения производственных операций биоморфичны по своей природе и, следовательно, являются элементами диссипативных систем, экспортирующих энтропию в окружающую среду, то есть в экосистему. Соответственно, роботизация сельского хозяйства в ее современном виде с использованием традиционных орудий и воспроизводством традиционных способов взаимодействия с почвой и растениями не только не способна привести к экономическому эффекту в виде результирующего полезного результата, но и неизбежно ускорит деградацию экосистемы в целом. Обострившиеся экологические проблемы обусловили зависимость инвестиционной привлекательности роботизации от ее экономической эффективности и экологического следа в масштабах экосистемы. А поскольку агроэкосистемы являются частью экосистемы, с которой агроэкосистема непрерывно обменивается веществом и энергией и в которой система положительных и отрицательных обратных связей поддерживает динамическое равновесие в виде постоянства своих параметров и энтропии, то возникновение экономического эффекта, в свою очередь, оказалось связанным со снижением экологического давления агроэкосистемы на экосистему, или, точнее, экспорта энтропии агроэкосистемы в экосистему. То есть экономический эффект возникнет только с переходом на обратный по отношению ко всему живому принцип максимизации собственной энтропии агроэкосистемы при минимизации экспорта энтропии в экосистему. Условия энергетического баланса в экосистеме при

выполнении такого принципа обуславливают требование снижения энергозатрат на выполнение агротехнических действий с соответствующим снижением себестоимости продукции и одновременно с повышением видового разнообразия и количества трофических цепей агроценоза с соответствующим повышением качества продукции в биоморфологическом отношении.

Для этого следует в первую очередь исключить из производственных процессов человека и его биоморфичные технологии, и орудия производства с их энтропийной расточительностью и, во-вторых, перейти на применение новых, по всей видимости небноморфичных энтропийно консервативных способов и приемов воздействия на почву и растения. Соответственно, предпосылки развития экологически безопасных агротехнологий могут возникнуть только в виде результатов фундаментальных исследований процессов преобразования вещества и энергии, осуществляемых в агротехнологиях.

*Перспективы перехода  
на альтернативное земледелие*

В настоящее время попытки достижения энтропийно консервативного земледелия предпринимают сторонники концепции «альтернативного» земледелия [9, 10]. Суть этой концепции заключается в стремлении к полному отказу от синтетических удобрений, пестицидов, регуляторов роста и кормовых добавок и строгом соблюдении агротехники севооборотов с активным применением посадок бобовых культур, сохранением растительных остатков, использовании навоза, компостов и сидератов, механической культивации, биологических методов защиты растений. Соответственно, энтропия агроландшафта при таком земледелии будет выше, чем при активном применении гербицидов и прочих пестицидов и синтетических удобрений [11, 12]. Но отказ от применения пестицидов приводит к снижению урожайности культур. Помимо этого существенно растет количество агротехнических действий с помощью мощных агрегатов с соответствующим ускорением машинной деградации почв и экспорта энтропии. Таким образом, переход на траекторию оздоровления сельхозугодий за счет широкого внедрения альтернативного земледелия также требует создания и внедрения новых, энтропийно консервативных, агротехнологий. Вероятно, что это будут агротехнологии безлюдного возделывания

вания сельхозугодий на основе выполнения производственных операций автономными робототехническими системами. При этом, как было показано выше, эти операции не могут быть антропоморфичными, как в сложившихся к настоящему времени приемах альтернативного земледелия. Например, в качестве первого необходимого шага к созданию неантропоморфичной агротехнологии роботизированной междурядной обработки посадок пропашных культур следует оптимизировать выполняемые роботами в производственных операциях алгоритмические, кинематические и динамические действия.

*Алгоритмические, кинематические  
и динамические аспекты  
задачи роботизации*

Для алгоритмизации действий агротехнического робототехнического устройства необходимо, во-первых, детальное знание общих агротехнических требований к междурядной обработке пропашных культур. Во-вторых, знание ограничений на кинематические действия и на динамические характеристики робототехнических устройств.

К агротехническим требованиям к междурядной обработке посадок относятся:

1. Своевременность обработки в агротехнически обоснованные сроки их проведения. Допустимые отклонения от оптимальных сроков исчисляются в часах.

2. Соблюдение глубины обработки почвы с учетом назначения обработки, состояния растений, условий погоды. В том числе сообразно степени развития корневой системы растений следует применять различные рабочие органы, установленные на определенную глубину воздействия на почву, обеспечивающую сохранение увлажненности нижних слоев почвы и облегчающую доступ воздуха к корням растений при перувлажнении верхних слоев почвы. При этом среднестатистические отклонения глубины обработки почвы не должны отклоняться от установленной более чем на 15%.

3. Уничтожение всех сорняков в междурядье. Ясно, что это требование ограничено необходимостью поддержания видового разнообразия биома.

4. Соблюдение защитной зоны вокруг культурного растения для предупреждения повреждений его рабочими органами или заваливания почвой. Ограничения исчисляются в сантиметрах.

5. Соблюдение установленных с учетом фазы развития растений глубины заклад-

ки и расстояния от рядков растений или гнезд при внесении удобрений с точностью не хуже  $\pm 8\%$ .

Из этого перечня видно, что алгоритмы действий робототехнического агрегата будут определяться с учетом кинематических и динамических характеристик конструкции агрегата. В настоящее время на полях можно увидеть опытные образцы робототехники самых различных компоновочных и конструктивных решений, реализованных на различных транспортных платформах с различными энергетическими базами. Еще ни одна кинематическая схема не зарекомендовала себя как безусловно перспективная для широкого применения.

Отсутствие даже компоновочных схем устройства робототехнических агрегатов для междурядной обработки посадок не позволяет отталкиваться от их конструктивных особенностей и вынуждает учитывать только ограничения, обусловленные общефизическими законами. Ограничения в соответствии со сведениями из области сопротивления материалов в первом приближении мы также принимаем несущественными, поскольку успехи технологий создания композитных материалов и достижения металлургов в создании сплавов с различными свойствами предоставляют все больше возможностей для решения сложных инженерно-конструкторских задач за счет свойств новых материалов.

В конечном счете в качестве первого шага оценки перспектив роботизации междурядной обработки посадок рассмотрим особенности выполнения глобальных, региональных и локальных перемещений рабочих органов и эффекторов робототехнического устройства для осуществления безлюдной междурядной обработки посадок.

Поскольку локальные и региональные перемещения рабочих органов и эффекторов происходят относительно несущей транспортной платформы робототехнического устройства, задача управления ими сводится к решению обратной задачи кинематики с вычислением известными способами значений состояний кинематических пар манипуляторных органов для обеспечения движения эффектора к заданным сенсорной системой робототехнического устройства параметрам рабочего положения.

К настоящему времени разработано множество методов решения обратной задачи кинематики для многосвязных манипуляторов. Их перечень с подробным анализом особенностей представлен в [13].

Представленный в перечне метод обратных преобразований достаточно просто получает значения положений кинематических пар манипулятора, но не дает однозначных решений [14]. Метод штрафных функций, использующий приемы нелинейного программирования и свойства нейросетей, из-за медлительности не подходит для использования в режиме реального времени [15, 16].

Мощный метод бикватернионного решения кинематической задачи управления не всегда имеет решение [17]. Метод интервалов предназначен для управления манипуляторами с простыми кинематическими схемами [18].

Методы Sequential Monte Carlo Method (SMCM), Style-based Inverse Kinematics и Mesh-based Inverse Kinematics требуют предварительного обучения модели, из-за чего метод малоприменим для условий неструктурированной среды применения манипулятора [19]. Метод трех базовых функций разлагает алгоритмы рабочих движений манипулятора для широкого класса задач управления положением и ориентацией эффектора манипулятора средствами формализма операторов расширения векторной алгебры [20–22]. Близким к нему методом является метод ФАБРИК, использующий построение пересечений осевых линий звеньев постоянной длины, из-за чего принципиально не пригоден для решения обратной задачи кинематики для «дельта-манипуляторов» [23].

Наиболее универсальным и применимым является метод, изложенный в статье [24]. Суть метода в пошаговом моделировании движения отдельной части манипулятора, осуществляющей определенное движение манипулятора. Дробление углов поворота шарниров можно задавать. На каждом шаге решается прямая задача кинематики для отслеживания положения схвата и корректировки выполнения следующего шага. В отличие от ранее разработанных методов пошагового вычисления положений сочленений звеньев манипулятора, в этом методе используются доказанные в теоремах о конечных углах поворота и смещения максимальные значения шага для каждого сочленения. Это позволяет не решать прямую задачу кинематики для корректировки алгоритма. Пошаговое движение прекращается при достижении заданного положения и ориентации эффектора с необходимой точностью.

Сравнение приведенных методов решения обратной задачи управления рабо-

чими органами и эффекторами позволяет ориентироваться на принципиальную выполнимость разработок систем управления манипуляторами различного назначения. Но для этого предварительно следует задать условия обратной задачи управления манипулятором – указать параметры пространственного положения и ориентации рабочих органов/эффекторов манипуляторов. Для этого система управления робототехнической системы должна обладать способностью оперативно распознавать производственную ситуацию и формировать алгоритмическое описание миссии предстоящей производственной операции. Распознавание ситуации, в свою очередь, включает восстановление геометрического образа пространства междурядий, позиционирование элементов конструкции робота в этом пространстве и оценку выполнения указанного выше перечня агротехнических операций в междурядье. При этом оценки части этих операций могут быть сведены к измерениям значений определенных геометрических и/или физических параметров/факторов, а для других потребуются использование быстродействующего искусственного интеллекта.

Окончательно приходим к выводу о ключевом значении успехов в развитии систем искусственного интеллекта для роботизации междурядной обработки посадок.

### Заключение

Существующие в настоящее время нейросетевые системы распознавания ситуаций в принципе применимы для обеспечения управления выполнением роботом агротехнических операций при обработке междурядий. Среди зарубежных разработчиков наибольших успехов добились компании CLAAS и John Deere, представившие ряд устройств для выполнения узкоспециализированных операций по обработке почвы на основе компьютерного зрения. Остальные разработчики пока на стадии запуска стартапов и R&D-проектов. В целом обзор лучших мировых разработок в области роботизации полеводства свидетельствует об отсутствии полноценных концепций решения задачи роботизации междурядной обработки посадок [25]. Мы объясняем это главным образом тем, что в разработках не преодолена традиция попыток использования в робототехнике антропоморфичных орудий.

Лидером по эффективности технологии автономной уборки урожая является авто-

пилот для уборочных комбайнов Cognitive Agro Pilot российской компании Cognitive Technologies. Опыт применения автопилота свидетельствует о том, что современный выполнимый и применимый на мобильной технике нейросетевой искусственный интеллект на пределе возможностей способен использовать для распознавания ситуации очень незначительное количество параметров ситуации. Cognitive Agro Pilot отслеживает кромку скошенной полосы поля, появление посторонних объектов в поле зрения камер и положение рулевого механизма шасси комбайна. Для распознавания производственной ситуации в междурядье нейросетевой искусственный интеллект должен будет в динамике отслеживать многократно большие количества параметров, вслед за распознаванием ситуации формировать производственные миссии и вырабатывать управляющие команды для приводов рабочих органов робота. Указанное обстоятельство не позволяет в обозримом будущем рассчитывать на экономически оправданную роботизацию междурядной обработки посадок сельскохозяйственных культур.

### Список литературы

1. Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Курс лекций для аспирантов по дисциплине «Эксплуатация машинно-тракторных агрегатов (МТА) в растениеводстве», 2016. 92 с.
2. Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 83 с.
3. Селиванов Н.И., Макеева Ю.Н. Адаптация колесных тракторов к технологиям почвообработки // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. URL: <https://science-education.ru/tu/article/view?id=19086> (дата обращения: 25.11.2022).
4. Капов С.Н., Орлянский А.В., Кожухов А.А., Бобрышов А.В., Лиханов В.А., Мирошникова В.В. Энергетическая оценка обработки почвы // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 3. С. 8–15.
5. Карабаницкий А.П., Левшукова О.А. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов. Краснодар: КубГАУ, 2014. 104 с.
6. Абакумов Е.В. Теория эволюции и экология почв // Роль почв в биосфере и жизни человека: материалы докладов Международной научной конференции к 100-летию со дня рождения академика Г.В. Добровольского, к Международному году почв (Москва, 5–7 октября 2015 г.). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. С. 13.
7. Здоровые почвы для здоровой планеты и здорового населения: ФАО призывает обратить вспять процесс деградации почв // Всемирный форум по продовольствию и сельскому хозяйству. Берлин, 2022. 3 с.
8. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 2. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с.
9. Никлаев В.С., Косинский В.С., Ткачев В.В., Сучилина А.А. Основы технологии сельскохозяйственного производства // Земледелие и растениеводство. 2000. 557 с.
10. Когоякова В.В., Мамонтова С.А. Альтернативные системы земледелия // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научной конференции (Красноярск, 15 октября 2019 г.). Красноярск, 2019. С. 34–39.
11. Поздняков А.В., Шуркина К.А. Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Науки о Земле. 2008. С. 206–212.
12. Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю. Синергетика: нелинейные процессы в экологии: монография. Сумы: Сумский государственный университет, 2016. 229 с.
13. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 81. 15 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-81.
14. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. 480 с.
15. Дыда А.А., Оськин Д.А. Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций // Фундаментальные исследования. 2015. № 11–4. С. 673–677.
16. Дыда А.А., Оськин Д.А., Константинова Е.А. Нейросетевое моделирование задачи обратной кинематики для манипуляционного робота // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12 (2). С. 254–257.
17. Челноков Ю.Н., Нелаева Е.И. Бикватернионное решение кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела // Известия Саратовского университета: Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16. С. 198–207. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-2-198-207.
18. Castellet A., Thomas F. Using interval methods for solving inverse kinematic problems. Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Computational Methods in Mechanisms (NATOASI). Bulgaria. Vol. 2. 1997. P. 135–145.
19. Courty N., Arnaud E. Inverse Kinematics Using Sequential Monte Carlo Methods. Proc. of the 5th International Conference on Articulated Motion and Deformable Objects (AMDO2008). Spain. 2008. P. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-540-70517-81.
20. Grochow K., Martin S.L., Hertzmann A., Popovic Z. Style-based inverse kinematics. ACM Transactions on Graphics (TOG). Proc. of ACM SIGGRAPH 2004. Vol. 23. P. 522–531. DOI: 10.1145/1015706.1015755.
21. Sumner R.W., Zwicker M., Gotsman C., Popovic J. Mesh-based inverse kinematics. ACM Transactions on Graphics (TOG). Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, 2005. Vol. 24. P. 488–495. DOI: 10.1145/1073204.1073218.
22. Беклемишев Н.Д., Платонов А.К., Соколов С.М., Трифонов О.В. Алгоритмы управления движением схвата манипулятора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 47. 36 с. DOI: 10.20948/prepr-2017-47.
23. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. Graphical Models. 2011. Vol. 73. P. 243–260. DOI: 0.1016/j.gmod.2011.05.003.
24. Каргинов Л.А. Иерархический подход к решению обратной задачи кинематики // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 03. С. 37–63.
25. Гольяпин В.Я. Сельское хозяйство 4.0. Тракторы. Роботы для полей: обзор интеллектуальной сельхозтехники // Агробизнес. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://ag-bztech.ru/article/robots-for-fields-review-of-intelligent-agricultural-equipment/> (дата обращения: 25.11.2022).