

УДК 631.3

UDC 631.3

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧИ СЕМЯН ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ FAST TOOL SERVO

IMPROVING THE ACCURACY OF SEED SUPPLY CONTROL USING FAST TOOL SERVO TECHNOLOGY

Стрельцов Никита Сергеевич
магистрант
Рязанский институт (филиал) Московского Политехнического университета, Рязань, Россия

Streltsov Nikita Sergeevich
master's student
Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia

Жбанов Никита Сергеевич
к.т.н., доцент кафедры
РИНЦ SPIN-код 7241-6650
Рязанский институт (филиал) Московского Политехнического университета, Рязань, Россия

Zhbanov Nikita Sergeevich
Cand.Tech.Sci., associate professor of the department
RSCI SPIN-code 7241-6650
Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia

В работе рассматривается способ улучшения качества высева пропашных культур через модернизацию технологии изготовления дозирующих дисков сеялок. Предложено использовать систему быстродействующего позиционирования инструмента (Fast Tool Servo – FTS) для финишной обработки поверхностей и отверстий дисков. Проанализированы возможности FTS по снижению шероховатости и вибраций. Обосновано, что высокая точность геометрии вакуумных отверстий, достижимая благодаря FTS, позволяет стабилизировать разрежение и улучшить удержание семян. Приведены оценки ожидаемых агротехнических показателей

The article discusses a method for improving the quality of seeding of row crops by modernizing the technology of manufacturing the dosing discs of seeders. It is proposed to modernize the manufacturing technology of the dosing discs using the Fast Tool Servo (FTS) system. The capabilities of FTS in reducing roughness and vibrations are analyzed. It is substantiated that the high accuracy of the geometry of the vacuum holes achieved by FTS allows for stabilizing the spacing and improving seed retention. The study provides estimates of the expected agronomic performance

Ключевые слова: СЕЯЛКА ТОЧНОГО ВЫСЕВА, ДОЗИРУЮЩИЙ ДИСК, FAST TOOL SERVO, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, ВАКУУМНЫЙ ЗАХВАТ, ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Keywords: PRECISION SEEDING SEEDER, DOSING DISC, FAST TOOL SERVO, SURFACE ROUGHNESS, VACUUM GRIP, PROCESSING ACCURACY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-220-011>

Введение

Качество посевной кампании напрямую влияет на урожайность сельскохозяйственных культур. Сегодня основные усилия направлены на совершенствование сеялок точного высева, которые обеспечивают равномерное распределение семян. Однако даже современные машины имеют недостатки, связанные с конструкцией дозирующих аппаратов. В частности, в работе [4] отмечается, что стабильность вакуума в камере

<http://ej.kubagro.ru/2026/06/pdf/11.pdf>

разрежения сильно зависит от качества изготовления высевающего диска. Любые отклонения в диаметре отверстий или шероховатости поверхности приводят к подсосам воздуха, что ухудшает захват семян.

Традиционные методы обработки дисков (штамповка, литье, обычное точение) не всегда обеспечивают нужную точность. В связи с этим возникает интерес к технологиям прецизионного машиностроения. Одной из перспективных технологий является система быстросейвающего привода инструмента (Fast Tool Servo – FTS). Изначально она создавалась для обработки оптики, но её потенциал может быть полезен и в агроинженерии.

Цель данной работы – оценить возможность применения FTS для изготовления дисков сеялок и определить влияние данной технологии на точность посева. Для этого были изучены принципы работы FTS, требования к дозирующим дискам и проведено их сопоставление с агротехническими критериями.

Материалы и методы

Системы FTS представляют собой приводы, которые позволяют перемещать режущий инструмент с высокой частотой и точностью. В отличие от стандартных приводов станка, FTS функционирует как система быстрой коррекции, компенсируя ошибки базовой машины.

Более детальный анализ работы системы позволяет выделить три ключевых компонента: привод, механическую передачу и алгоритм управления. Привод (пьезоэлектрический актуатор, либо двигатель с голосовой катушкой) создаёт усилие, однако сам по себе не гарантирует точность. Для обеспечения точности применяется гибкая подвеска, которая направляет движение инструмента строго по одной оси, исключая люфты и перекосы, характерные для традиционных направляющих. Система

управления в реальном времени сравнивает заданную траекторию с фактическим положением инструмента (полученным с лазерного датчика) и корректирует управляющий сигнал. Наглядно компоненты системы показаны на рисунке 1.

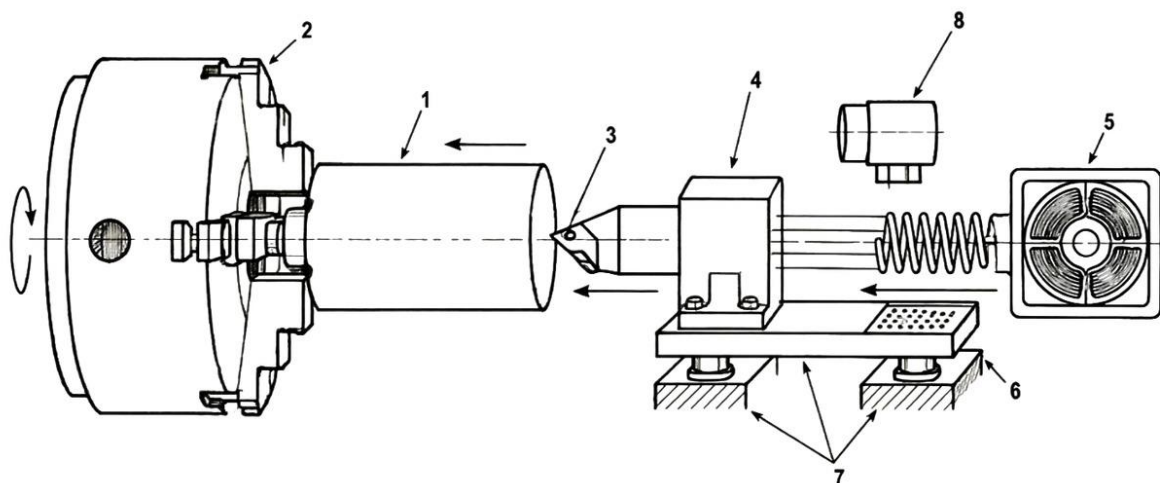


Рисунок 1 – Схема работы системы Fast Tool Servo (1 – заготовка, 2 – шпиндель станка, 3 – алмазный резец, 4 – держатель резца, 5 – двигатель с голосовой катушкой, 6 – механизм гибких шарниров, 7 – подшипник воздушной подушки, 8 – лазерный датчик перемещения)

Современные алгоритмы, такие как скользящее режимное управление или гибридные схемы с упреждающей связью, позволяют компенсировать внешние возмущения силы резания и внутренние нелинейности привода, включая гистерезис пьезоматериалов.

Существуют различные типы FTS. В исследовании [2] описана система на базе пьезоэлектрического актуатора для точения валов. Авторы применили скользящее режимное управление, что позволило компенсировать влияние сил резания и гистерезис. Точность

позиционирования достигала $\pm 0,1$ мкм. Данный показатель имеет существенное значение для обработки поверхности диска, которая должна быть максимально гладкой для обеспечения стабильности вакуума.

В работе [1] представлен альтернативный вариант с использованием двигателя с голосовой катушкой и воздушных подшипников. Особенностью данной конструкции стала система противовеса, которая снизила вибрацию системы с ± 3 мкм до $\pm 0,145$ мкм. Это имеет ключевое значение для обработки тонких дисков, подверженных вибрации при резании.

Также следует отметить двухкаскадные системы [3]. В данных системах один привод обеспечивает большой ход, а второй – высокочастотную коррекцию. Управление осуществляется по принципу «ведущий-ведомый». Это позволяет отслеживать сложные траектории с ошибкой менее 1%. Для диска сеялки это означает, что каждое вакуумное отверстие будет выполнено с высокой повторяемостью размеров.

Главная задача дозирующего диска – удерживать семя вакуумом до момента сброса в сошник. На рисунке 2 представлена конструкция типового высевающего диска сеялки точного посева.

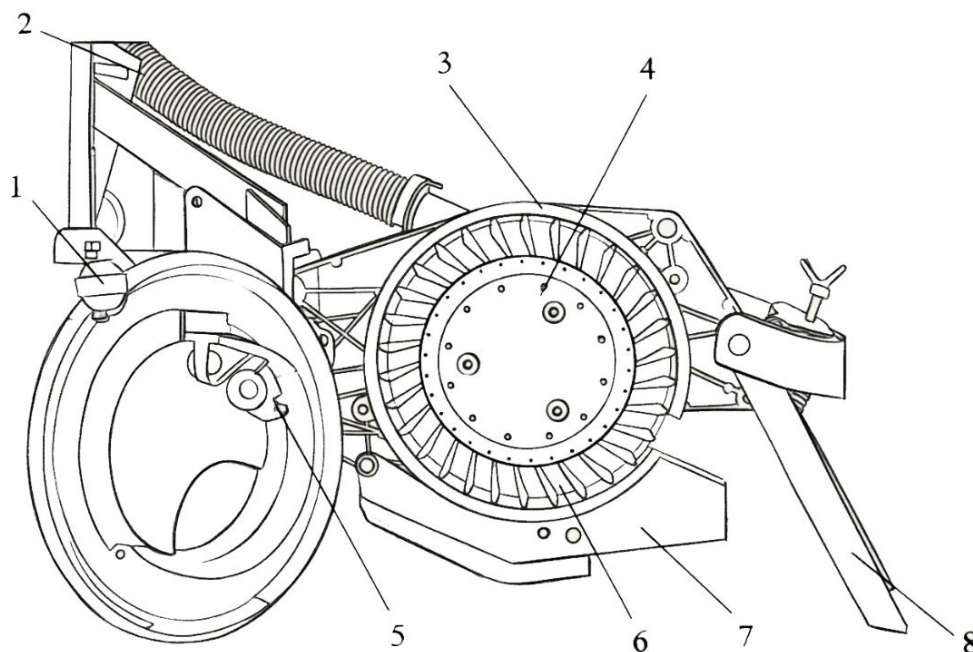


Рисунок 2 – Конструктивная схема высевающего диска сеялки точного высева (1 – регулировочный рычаг съемника семян; 2 – воздуховод; 3 – корпус высевающего аппарата; 4 – высевающий диск; 5 – съемник семян; 6 – крыльчатый диск; 7 – сошник; 8 – загортач)

В статье [4] показано, что изменение диаметра отверстий влияет на пропускную способность воздуха. При неодинаковых отверстиях вакуум становится нестабильным, что может привести к преждевременному падению семян или их незахвату.

Кроме того, важны критерии выбора сеялки. В работе [5] методом анализа иерархий было выявлено, что наиболее значимыми показателями являются «число семян, заделанных на заданную глубину» и «распределение растений в рядке». Данные параметры зависят от стабильности работы высевающего аппарата. При неточном изготовлении диска семена распределяются неравномерно.

Применение FTS позволяет решить данные проблемы на этапе производства. За счёт высокочастотной коррекции можно достичь

шероховатости поверхности $Ra = 0,25$ мкм [2]. Обычно такие показатели получают только шлифованием. При такой гладкости рабочей поверхности диска утечки вакуума через микронеровности минимизируются.

Результаты исследования

Утечки через зазор между диском и корпусом составляют существенную долю общего расхода воздуха, что можно оценить по формуле расхода через кольцевую щель: $Q_{\text{ут}} \sim h^3$, где h – высота неровностей. При $Ra = 2,5$ мкм и $Ra = 0,25$ мкм отношение расходов составит $\left(\frac{2,5}{0,25}\right)^3 = 1000$. Однако в реальности утечка ограничена конструкцией, поэтому, согласно [4], для типовых дисков утечки могут достигать 40%.

При традиционных методах обработки (точение, штамповка) шероховатость поверхности обычно находится в диапазоне $Ra = 2,5$ – $6,3$ мкм, тогда как применение технологии FTS позволяет достичь $Ra \sim 0,25$ мкм, что соответствует улучшению в 10–25 раз. Возьмём за основу, что параметр шероховатости и объём паразитных утечек имеют пропорциональную зависимость. Тогда снижение Ra с 2,5 мкм до 0,25 мкм теоретически позволяет сократить утечки с 40% до 4% от общего расхода воздуха, то есть на 90%.

Для центробежных машин справедливо соотношение $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^n$, где P_1 и P_2 – базовая и изменённая мощности соответственно (Вт), Q_1 и Q_2 – базовый и изменённый расходы воздуха соответственно ($\text{м}^3/\text{с}$), n – эмпирический показатель ($1,5 \leq n \leq 2$). Согласно закону подобия для центробежных насосов и вентиляторов, потребляемая мощность изменяется пропорционально кубу частоты вращения, а расход – первой степени, откуда следует, что $P \sim Q^{1,5}$ для ламинарного режима. В рабочем

диапазоне обычно принимают $n = 1,75$. Из вышеуказанного соотношения получаем коэффициент изменения мощности K , который рассчитываем по формуле (1).

$$K = \frac{P_1}{P_2} \approx \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^n \quad (1)$$

Подставив в (1) имеющиеся значения, получим $K = \left(\frac{64}{100} \right)^{1,75} = 0,46$. Следовательно, при шероховатости $Ra = 0,25$ мкм доля утечек в общем расходе снижается с 40% до $40\% \times 0,46 = 18,4\%$. Общее энергопотребление системы станет $60\% + 18,4\% = 78,4\%$ (где $100\% - 40\% = 60\%$ - расход воздуха на полезную работу).

При таких условиях снижение утечек на 46% может привести к уменьшению потребляемой мощности вакуумной установки на $100\% - 78,4\% = 21,6\%$, сохраняя требуемый уровень разрежения в камере. Результаты расчёта относительного энергопотребления представлены на рисунке 3.

Предполагаемый эффект наглядно показан на рисунке 3.

В плане интеграции технология реализуется следующим образом: FTS устанавливается на суппорт токарного станка, основная форма диска вытачивается штатными приводами, а финишная обработка отверстий и плоскости осуществляется через FTS. Это позволяет модернизировать существующее оборудование без приобретения сверхдорогих ультрапрецизионных станков.

Следует отметить проблему вибраций. При обработке перфорации диска возникают динамические нагрузки. В работе [1] показано, что без противовеса вибрации могут ухудшать точность. Поэтому для производства дисков рекомендуется использовать схемы с компенсацией инерционных сил. Это продлит ресурс станка и инструмента.

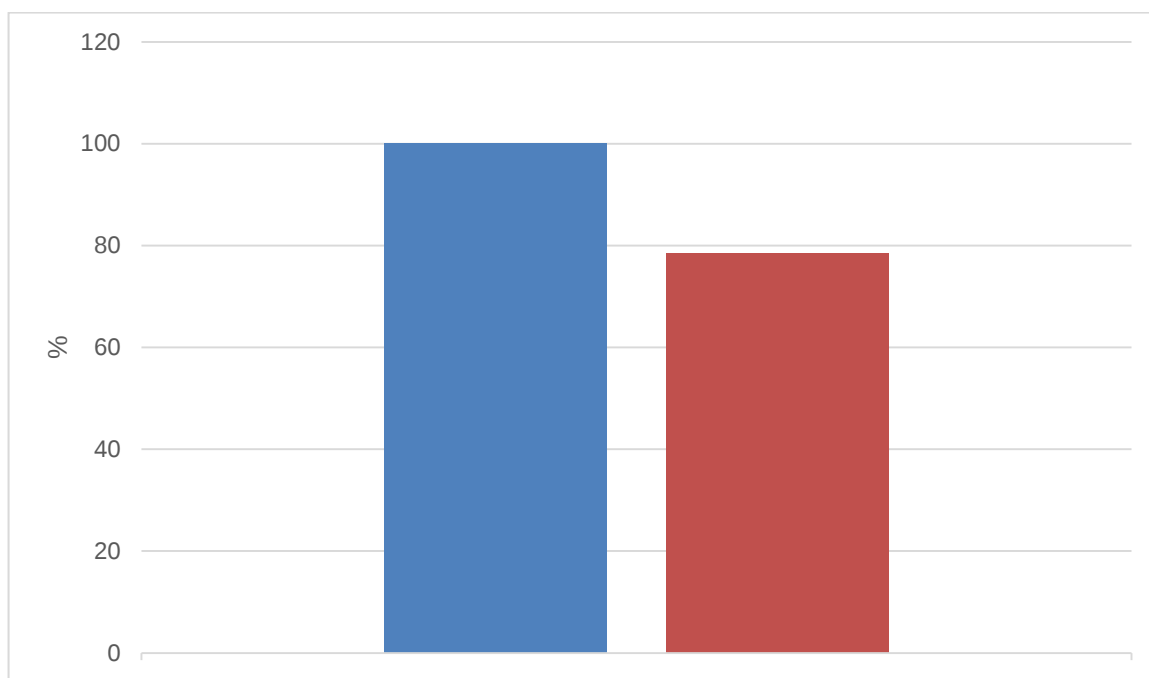


Рисунок 3 – Сравнение теоретического энергопотребления вакуумной установки: 1-й столбец – шероховатость диска $Ra = 2,5 \text{ мкм}$ (традиционная обработка), 2-й столбец - $Ra = 0,25 \text{ мкм}$ (обработка FTS). Значения нормированы относительно 100% для первого случая.

Стоит отметить несколько направлений, в которых улучшение качества диска влияет на работу сеялки в поле. Во-первых, стабильность вакуума. При идеальной геометрии отверстий, полученной благодаря FTS, можно снизить общее разрежение в системе. Это уменьшает нагрузку на вентилятор и снижает энергопотребление. Во-вторых, надёжность захвата. Гладкая поверхность вокруг отверстия обеспечивает лучшее прилегание к семени. В работе [4] отмечается, что каждое пустое отверстие влияет на степень разрежения. При качественном диске таких «холостых» утечек будет меньше. В-третьих, равномерность высева. В исследовании [5] лучшими признавались сеялки, обеспечивающие минимальное отклонение глубины заделки. Точный диск обеспечивает одинаковый объём захвата для каждого семени, что снижает вероятность двойников или пропусков.

Существует и экономический аспект. Системы FTS требуют значительных затрат и квалифицированного обслуживания. Однако в масштабе производства партии дисков повышение качества может окупиться за счёт снижения брака и повышения класса сеялки. В настоящее время наблюдается тенденция к электрификации приводов сеялок [4], и внедрение точной механики представляет собой логичное продолжение этого процесса.

Анализ литературы показывает, что технологии FTS являются достаточно зрелыми. В работе [3] продемонстрирована ошибка отслеживания менее 1% даже на высоких частотах. Для задач агроинженерии требуемые частоты ниже, чем в оптике, поэтому запас точности будет значительным.

Однако существуют нюансы. Алгоритмы управления, описанные в [2] и [3], требуют настройки. В условиях сельскохозяйственного производства необходимы более простые решения. Возможно, целесообразно разработать адаптивный контроллер, автоматически подстраивающийся под износ инструмента.

Также представляет интерес направление «интеллектуальных» дисков. При изготовлении диска с высокой точностью упрощается настройка системы мониторинга высева. Датчики будут реагировать на реальные проблемы с потоком семян, а не на дефекты диска.

Заключение

Использование технологии Fast Tool Servo для обработки дисков сеялок представляет собой реалистичное решение, несмотря на ряд технических сложностей. Основное преимущество данного подхода заключается в возможности получения точности поверхности и геометрии отверстий, труднодостижимой обычными методами. Для вакуумных

систем это имеет критическое значение, поскольку напрямую влияет на стабильность разрежения.

Применение гибридных алгоритмов управления и схем с противовесом позволяет существенно снизить вибрации и ошибку отслеживания, что особенно важно при работе с тонкостенными дисками. Внедрение FTS потребует затрат на оборудование и обучение персонала, однако с учётом тенденции к электрификации и автоматизации сельскохозяйственной техники данные вложения могут окупиться за счёт повышения качества посевных агрегатов.

Прецизионная обработка ключевых узлов дозирующего аппарата создаёт резерв для улучшения равномерности высева и снижения потерь семян, что в конечном счёте должно положительно сказаться на урожайности.

Библиографический список

1. Gong Z., Huo D., Niu Z., Chen W., Cheng K. A novel long-stroke fast tool servo system with counterbalance and its application to the ultra-precision machining of microstructured surfaces // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 173. P. 109063.
2. Zhu W.-H., Jun M.B., Altintas Y. A fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001. Vol. 41. P. 953–965.
3. Zhao D., Zhu Z., Huang P., Guo P., Zhu L., Zhu Z. Development of a piezoelectrically actuated dual-stage fast tool servo // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. P. 106873.
4. Земляной А.А., Мишин Б.С., Дорошин Е.С. Современные направления развития высевающих аппаратов сеялок точного высева // *Вестник науки*. 2023. № 12 (206). С. 100–107.
5. Бородаева М.Г., Каргина А.В., Зубрилина Е.М., Маркво И.А. Выбор модели сеялки точного высева с помощью метода анализа иерархий // *Международный научный журнал «Символ науки»*. 2017. № 03-2. С. 21–25.

References

1. Gong Z., Huo D., Niu Z., Chen W., Cheng K. A novel long-stroke fast tool servo system with counterbalance and its application to the ultra-precision machining of microstructured surfaces // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 173. P. 109063.

2. Zhu W.-H., Jun M.B., Altintas Y. A fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41. P. 953–965.
3. Zhao D., Zhu Z., Huang P., Guo P., Zhu L., Zhu Z. Development of a piezoelectrically actuated dual-stage fast tool servo // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 144. P. 106873.
4. Zemljanoj A.A., Mishin B.S., Doroshin E.S. Sovremennye napravlenija razvitija vysevajushhih apparatov sejalog tochnogo vyseva // Vestnik nauki. 2023. № 12 (206). S. 100–107.
5. Borodaeva M.G., Kargina A.V., Zubrilina E.M., Markvo I.A. Vybora modeli sejalki tochnogo vyseva s pomoshh'ju metoda analiza ierarhij // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Simvol nauki». 2017. № 03-2. S. 21–25.