

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПОРТАЛЬНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

**SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS
OF HIGH-PERFORMANCE WIDE SPAN
AGRICULTURAL MACHINES**

Ченьхой Чжао¹, Ключников А. В.¹, канд. техн. наук,
Шидловский И. И.¹, Захаров А. В.², канд. техн. наук, доц.,
Филипова Л. Г.², ст. преп.

¹ООО «УайТиОу Технолоджи БиЭлЭр», Индустриальный парк
«Великий камень», г.Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь

Chenhui Zhao¹, A. Kliuchnikov¹, Ph. D. in Eng., I. Shidlovskiy¹,
A. Zakharov², Ph. D. in Eng., Ass. Prof., L. Filipova², Senior Lecturer,
¹LLC "YTO Technology Blr", Industrial Park "Great Stone",
Minsk, Belarus

²Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Применение портальных сельскохозяйственных машин является одним из способов для повышения производительности при обработке полей большой площади. При этом такая технология позволяет уменьшить долю технологической площади, используемую в качестве колеи для прохода движителей. Основными параметрами портального трактора является его технологическая колея и мощность силовой установки. В статье рассмотрены основные аспекты для выбора параметров портального сельскохозяйственного средства.

Using of wide span agricultural machines is one of the ways to increase productivity when processing large-area fields. At the same time, such technology allows to reduce the share of the technological area used as a track for the passage of movers. The main parameters of a wide span tractor are its technological track and the power of the power unit. The

article considers the main aspects for choosing the parameters of a wide span agricultural vehicle.

Ключевые слова: портальный трактор, точное земледелие, технологическая колея.

Keywords: wide span tractor, controlled traffic farming, technological track.

ВВЕДЕНИЕ

Широкозахватный портальный трактор – это сельскохозяйственное энергетическое орудие с длинной опорной балкой. Его отличительной особенностью от других силовых транспортных средств является то, что он движется по постоянным технологическим путям, расположенным на расстоянии, равном его пролету, в зоне размещения сельскохозяйственных орудий. Широкозахватный трактор работает не только как тяговая машина, но и как силовая база для различных широкозахватных сельскохозяйственных работ. Примеры портальных систем показаны на рис. 1.



Рисунок 1 – Примеры портальных сельскохозяйственных систем:
портальная сеялка Horsch Gantry RO G 500 (сверху слева);
трактор ASA-Lift WS 9600 WS (сверху справа);
портальный трактор Nexat с набором орудий для выравнивания грунта и посева
(снизу)

Использование портальной машины с активными навесными агрегатами обладает наибольшей перспективой, так как это позволяет минимизировать некоторые ее недостатки, и повысить общий КПД машины. КПД машины может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\eta = \eta_T \cdot \alpha_T + \eta_{PTO} \cdot \alpha_{PTO} = \eta_T \cdot (1 - \alpha_{PTO}) + \eta_{PTO} \cdot \alpha_{PTO}$$

где α_T и α_{PTO} – степени использования мощности на привод ведущих колес (тягу) и на привод ВОМ.

η_T и η_{PTO} – тяговый КПД трактора и КПД вала отбора мощности.

Обычно тяговый КПД трактора η_T лежит в диапазоне 60–70 %, а КПД передачи мощности на ВОМ находится в пределах 93–95 %. По причине того, что КПД отбора мощности через ВОМ намного выше тягового КПД машины, то наиболее эффективно энергия используется при работе с активными и комбинированными агрегатами. Чем больше доля мощности, передаваемая через ВОМ, тем больше общий КПД машины.

Конструктивно порталы тракторов довольно просты. За счет работы с активными агрегатами на хорошо подготовленных ровных полях они не испытывают таких перегрузок как классические конструкции. Но при этом существует ряд принципиальных вопросов, которые должны быть решены для возможности их нормальной работы в полевых условиях по технологии CTF (Controlled Traffic Farming), которая требует очень точного позиционирования и управления машиной [1]. В связи с этим выделяют несколько главных вопросов при выборе параметров порталных машин:

- 1) выбор оптимальной ширины порталной машины;
- 2) обеспечение рулевого управления при прямолинейном движении;
- 3) обеспечение поворота на разворотной полосе.

При использовании сельскохозяйственных машин с различной шириной захвата большая часть плодородной почвы подвергается воздействию колес тракторов и машин. Эффективность управляемого земледелия тем выше, чем меньше непродуктивных участков поля, отведенных под инженерную зону. Она, определяется проходом, который зависит от ширины колеи и параметров колес трактора. Увеличение ширины колеи положительно влияет на показатели использования земли в управляемом земледелии, однако технически проектировать такие машины и автоматизировать управление их движением становится сложно. Поэтому целесообразно увеличивать ширину колеи широкозахватных тракторов до определенной величины, позволяющей иметь рациональные показатели использования земли в управляемом транспортном земледелии.

На сегодняшний день существуют порталные машины с шириной колеи от 3 до 21 метра. Процент потери обрабатываемой площади w_i под инженерной зоной определяется по следующей зависимости [2].

$$w_i = \frac{b_c + c}{L \cdot A} \cdot \{ [L - 2 \cdot (K + b_c + c)] \cdot [(A - b_c - c) / K + 1] + 4 \cdot A + \pi \cdot [A - b_c - c] \}$$

где L и A – длина и ширина поля;

b_c – ширина колеи одного колеса;

c – рулевой допуск (амплитуда боковых отклонений от прямолинейного движения);

K – расстояние между колесами (ширина) широкозахватного трактора.

Анализ выражения показывает, что величина потерь w_i уменьшается с увеличением колеи K . Но при увеличении ширины увеличивается масса машины, а, следовательно, и необходимая ширина колес. При увеличении ширины шин b_c и технологического допуска c увеличиваются потери площади поля под технической зоной. Выражение не имеет предельной функции w_i от аргумента K , однако позволяет выявить точку рационального оптимального значения ширины колеи, а также оценить влияние параметров ходовой части ширококолейного трактора и величины c технологического допуска в управляемом транспортном земледелии. Он равен ширине защитной зоны от колеса до растения плюс величина погрешности прямолинейного движения.

Результаты исследования указанной выше зависимости показывают, что изменения ширины K на графиках, можно условно разделить на два интервала [2]. В каждом из интервалов зависимость w_i от K близка к линейной, причем функция w_i в интервале начальных значений K быстро убывает, а при более высоких значениях K – медленно.

Применив метод наименьших квадратов для определения параметров рациональной функции, были определены точки рационального оптимума двухзонных кривых. Для поля площадью 100 га квадратного размера 1000×1000 м и ширины движителей 0,35–0,75 м рациональное значение ширины их колеи составляет 7–8 м.

Полученные значения ширины колеи ширококолейного трактора при использовании шин привода 0,4 м позволяют иметь величину потерь площади под инженерной зоной не более 6 %. Однако, при увеличении ширины колеи K до 9 м величина потерь площади находится на уровне 5 %. Дальнейшее увеличение нецелесообразно, так как оно приведет к незначительным улучшениям в 1–2% при существенном усложнении конструкции. При ширине шин 0,75 м и ширине платформы 14 м (портальный трактор Nexat) потери площади составят 6,5 % и 7,0 % (для шин шириною 0,8 м). Для примера, у классического трактора, который работает с шириной СТФ прохода 9 м потери площади составят 15 %, при ширине 12 м – 11 %.

Ширина технологического допуска c также существенно влияет на потери площади поля под инженерной зоной или полосой движения. При увеличении значения c до 0,3 м потери площади под полосами движения увеличиваются в среднем в 2 раза в зависимости от вариантов ширины шин.

Поэтому для работы широкозахватного трактора очень важен вопрос точного автоматического вождения, который позволит максимально снизить амплитуду боковых отклонений от заданной прямолинейной траектории движения и, как следствие, уменьшить величину c .

Таким образом из проведенных исследований видно, что с учетом технологического допуска потеря площади при работе портальных машин составляет около 7,5 %. Наиболее рациональной шириной является величина 7–8 м. Дальнейшее увеличение ширины портала не приводит к существенным улучшениям. Кроме того, при работе по СТФ технологии требуется не только точное позиционирование машины, но и обеспечение ее точного прямолинейного движения для снижения потерь площади под технологической зоной.

Учитывая общую структуру шасси и рулевого механизма портальных машин, различными исследованиями было доказано, что наиболее простым вариантом является бортовое рулевое управление при работе на поле [3, 4]. Это приводит к необходимости использования в качестве трансмиссии независимые мотор-колеса на всех осях, что позволяет обеспечить поворот за счет изменения скорости вращения передних и задних колес с правой и левой стороны машины. Но при транспортировке, работе на разворотной полосе, при объезде препятствий, эффективнее использовать рулевое управление

за счет изменения углов колес для получения необходимой траектории. То есть для оптимальной работы во всех условиях машина должна иметь возможность осуществлять оба вида поворота, а также их комбинацию.

В процессе работы тягового средства совершаются не только активные (управляемые) повороты, но и пассивные, совершая криволинейное движение не под управляющим воздействием оператора, а под воздействием внешних сил [3]. Примером пассивного управления является отклонение транспортного средства с большой шириной пролета от прямой линии под воздействием приложенной несоосной тяговой нагрузки сопротивления сельскохозяйственного орудия.

Исследования поворота порталных средств проводились различными институтами [4]. В результате анализа наиболее рациональными схемами приводов оказались варианты с передними управляемыми колесами и задними приводными с возможностью подтормаживания (схема 1) а также вариант со всеми приводными моторколесами (схема 2).

Первоначальные исследования поворотной способности широкопролетной машины показывают, что схема 1 практически не подвержена влиянию вертикальной нагрузки на ее ведущие колеса и при этом демонстрирует наименьший радиус поворота широкопролетной машины. Тем не менее, при оснащении передним сельскохозяйственным орудием, что приводит к дополнительной вертикальной нагрузке на переднюю часть машины, она теряет способность двигаться из-за потери сцепления на ведущем колесе. Широкопролетное транспортное средство, использующее схему 2 с бортовым поворотом, демонстрирует повышенную маневренность. Но использование колес на твердой поверхности во время бортового поворота приводит к повышенному буксованию, что приводит к повышенному износу движителей.

Экспериментально установлено и теоретически подтверждено, что торможение заднего внутреннего колеса приводит к уменьшению радиуса поворота в 1,5 раза по сравнению со схемой номер 1 без подтормаживания колес.

Однако при нагрузке на передние колеса свыше 65 % от массы широкопролетная машина теряет способность к движению. В ходе экспериментов это проявлялось в повышенном буксовании, отклоне-

нии от стационарной траектории поворота и характеризовалось большим разбросом результатов измерений. То есть схема номер 1 может быть применена только в случае, когда на передние колеса приходится не более 65 % веса машины [4]. Это говорит о том, что для универсального средства, которое имеет широкий спектр применяемых орудий необходимо использовать приводную мотор-колесную схему для каждого колеса. В табл. 1 приведены основные характеристики порталных сельскохозяйственных систем.

После выбора колеи и типа привода колес определяются параметры других узлов машины – колес, гусениц, мощности моторной установки, мотор колес. Самые энергозатратные агрегаты, которые и определяют мощность силовой установки – это агрегаты для тяговых операций (плуги, бороны). По анализу требований к тяговым операциям, средняя величина мощности на один корпус плуга шириной 40 см составляет 30–40 л. с. в зависимости от грунта. То есть для работы традиционного трактора с набором плугов общей шириной 14 метров понадобится 35 корпусов суммарной мощностью 1050–1400 л. с. Учитывая, что при технологии широкополосного СТФ колеса движутся по одним и тем же участкам грунта, которые сильно уплотняются и обеспечивают больший коэффициент сцепления и меньшие потери на буксование требуемая мощность двигателя может быть уменьшена на 20–25 %.

Таблица 1 – Основные характеристики порталных сельскохозяйственных систем

Параметр	Значение	Примечание
Мощность силовой установки	600–700 л. с.	Возможно разделение на две независимые установки мощностью по 350 л. с.
Тип силовой установки	Гибридная	В перспективе – топливные ячейки
Мощность генератора	550–650 л. с.	Возможно разделение на две независимые установки мощностью по 325 л. с.
Емкость бака	1200–1500 л	–
Тип трансмиссии	Мотор колеса с электромоторами	–
Мощность электромоторов	4 мотора по 160–210 л. с.	Мощность увеличена по сравнению с мощностью генератора для возможности компенсации перераспределения веса

Окончание табл. 1

Параметр	Значение	Примечание
Максимальный вес платформы	35 тонн	Масса вместе с агрегатом ограничивается нагрузкой на шину. Для увеличения массы нужно устанавливать гусеничные тележки
Ширина портала	9–12 метров	—
Рулевое управление	Поворот колес (для движения по дорогам и разворота) Бортовой поворот (для сохранения прямолинейности движения в поле)	Для уменьшения радиуса поворота и увеличения быстродействия требуется разработка комбинированной системы рулевого управления

Как было описано в исследованиях поворота порталных машин, она должна иметь независимый привод на каждое колесо. Привод может быть гидростатическим, но для увеличения общего КПД для перспективных машин нужно выбирать электрический привод. Общий отбор мощности на вспомогательные системы машины в среднем составляет 10 %. Таким образом электрический генератор привода колес сможет потребить около 1000 л. с. Учитывая КПД генераторов и электрических моторов 95 %, требуемая мощность каждого из четырех электрических мотор-колес будет равна 200–220 л. с. (150–160 кВт).

Необходимую мощность свыше 600 л. с. может выдавать силовая установка гибридного типа, содержащая дизельный двигатель и генератор. Для снижения расхода топлива на легких операциях силовая установка может быть разделена на две части, которые могут работать как вместе, так и по отдельности. При выполнении легких операций с загрузкой менее 50% одна из установок может быть отключена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из приведенных анализов результатов практических и теоретических исследований, первоначальный и основной параметр порталной платформы, который в последствии определяет все остальное, – это ее ширина. С одной стороны, увеличение ширины позволяет уменьшить площадь потерь. Но в то же время, это требует

установку более широких шин, а также увеличивает площадь разворотных полос. При работе на полях малой площади или полях криволинейной формы широкие порталные системы не целесообразны для использования. Минимальная площадь поля для работы порталных систем должны составлять 100 га. На меньших площадях использование таких систем не имеет положительного эффекта. Оптимальная ширина порталной системы высокой мощности свыше 450 л. с. лежит в диапазоне 7–8 м. Дальнейшее увеличение ширины не эффективно.

ЛИТЕРАТУРА

1. User requirements for a Wide Span Tractor for Controlled Traffic Farming. / H. H. Pedersen, C. G. Sorensen, F. W. Oudshoorn, J. E. McPhee // International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference “From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry”, 3–5 July 2013. – Billund, 2013. – pp. 83–94.
2. Research of possibilities for efficient use of wide span tractor (vehicle) for controlled traffic farming / V. Bulgakov, V. Adamchuk, V. Kuvachov, S. Ivanovs // Conference "Engineering for rural development", , 24-26 May 2023. – Jelgava, Latvia. – p. 281–287.
3. Theoretical study of the movement of the wide span machine in quasi-static turning mode / J. Olt, V. Bulgakov, V. Adamchuk [et al.] // Agronomy Research. – 2014. – № 22 (1). – p. 217–226;
4. Theoretical justification of the turn of a wide span tractor (vehicle) for controlled traffic farming / V. Bulgakov, V. Adamchuk, V. Kuvachov [et al.] // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2017. – Vol. 53 (3). – p. 159–167.