

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ МАШИНЫ МЕЖДУ МОДУЛЯМИ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

О.И. Мисуно,

доцент каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Д.А. Жданко,

проректор по учебной работе и производству БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье обосновано повышение эксплуатационных показателей работы почвообрабатывающих машин за счет рационального распределения тягового сопротивления между энергетическим (трактором) и технологическим (опорно-приводная тележка) модулями мобильного энергетического средства при наименьшей величине потерь мощности на буксование движителей.

Ключевые слова: энергонасыщенный трактор, энергетический модуль, технологический модуль, модульная схема, почвообрабатывающий агрегат, производительность, ширина захвата, скорость, буксование, сцепной вес, тяговое сопротивление.

The article substantiates the increase in the operational performance of tillage machines due to the rational distribution of traction resistance between the power (tractor) and technological (support-drive trolley) modules of the mobile power device with a minimum of power loss on the slipping of the movers.

Key words: power-packed tractor, power module, technological module, modular scheme, tillage unit, productivity, grip width, speed, slipping, coupling weight, traction resistance.

Введение

Перед агропромышленным комплексом республики стоит задача повышения производительности технологических процессов и, как результат, снижения затрат на производство сельскохозяйственной продукции.

Повышение производительности в растениеводстве, в частности, на обработке почвы, достигается увеличением тяговой мощности энергетических средств, энергонасыщенности тракторов. Анализ зависимостей тяговой мощности трактора от его тягового усилия показывает, что максимальная мощность достигается при определенном соотношении тягового усилия и скорости движения. Следовательно, при повышении энергонасыщенности трактора его возрастающую тяговую мощность можно реализовать через увеличение тягового усилия трактора и его агрегатирования с широкозахватными сельскохозяйственными машинами или увеличением рабочей скорости движения агрегата. Темп прироста производительности агрегата, как за счет увеличения ширины захвата, так и за счет увеличения скорости движения, отстает от темпа роста мощности двигателя трактора.

В настоящее время актуальной задачей является повышение эксплуатационных показателей работы почвообрабатывающих машин в агрегате с тракторами «БЕЛАРУС». Решение этой задачи обеспечивает повышение эффективности технологических процес-

сов обработки почвы. Значительный вклад в решение проблем совершенствования почвообрабатывающих машин и агрегатов внесли ученые – Д.А. Чудаков, Г.М. Кутьков, И.П. Ксенович, М.Д. Подскребко, З.И. Липкович, В.В. Кацыгин, Г.Н. Синеоков, Н.Д. Лепешкин, В.Т. Надькто и другие.

К числу важнейших эксплуатационных показателей работы почвообрабатывающих агрегатов относятся производительность, которая, как известно, определяется количеством выполненной в единицу времени работы определенного качества. Известно, что производительность агрегатов на обработке почвы зависит в основном от энергоемкости технологического процесса, энергетических возможностей трактора и степени использования времени смены и определяется по формуле

$$W = 0,36Bv\tau, \quad (1)$$

где W – часовая производительность почвообрабатывающего агрегата, га/ч;

B – ширина захвата почвообрабатывающей машины, м;

v – рабочая скорость движения агрегата, м/с;

τ – коэффициент использования времени смены.

Как видно из выражения (1), наибольшая производительность почвообрабатывающего агрегата может быть достигнута при определенной скорости движения и ширине захвата орудия.

Повышение производительности увеличением ширины захвата орудия сопровождается неизбежным увеличением габаритных размеров и массы агрегата, снижает его маневренность, уменьшает коэффициент использования времени смены. При этом для реализации возрастающего тягового усилия требуется увеличение сцепного веса сельскохозяйственного трактора, что влечет повышенный расход энергии. Так, на передвижение массы пахотного агрегата по полю расходуется свыше 30 % энергии, затрачиваемой двигателем. На перемещение одной тонны массы пахотного агрегата затрачивается до одного килограмма топлива на один гектар [1].

Повышение производительности агрегата за счет увеличения скорости движения также имеет ряд ограничивающих факторов. С увеличением скорости движения агрегата возрастает тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины, приводящее к возрастающим энергетическим затратам на выполнение технологического процесса, увеличиваются динамические нагрузки, уменьшается максимальное значение тягового КПД. Коэффициент использования времени смены с увеличением скорости движения агрегата также снижается, так как увеличиваются затраты времени на разворот, на техническое и технологическое обслуживание, а доля времени, затрачиваемого на производство полезной работы, уменьшается. Управление агрегатом при обработке почвы на скоростях 10-11 км/ч – это напряженный труд для механизатора, а на скоростях выше 12 км/ч на пахоте – вести трактор по дну борозды практически невозможно [1].

Увеличение ширины захвата почвообрабатывающей машины при одновременном повышении скорости еще больше снижает значение коэффициента использования времени смены. В результате этого эффективность применения скоростных широкозахватных агрегатов падает резче, чем орудий с меньшей шириной захвата.

Темп прироста производительности почвообрабатывающего агрегата, как за счет увеличения ширины захвата, так и за счет увеличения скорости движения, отстает от темпа роста мощности двигателя трактора [2].

Снижение расхода топлива, повышение производительности и в целом эффективности использования энергонасыщенных тракторов на обработке почвы в некоторой мере достигается иногда за счет балластирования, т.е. увеличения сцепного веса колесных тракторов путем навешивания дополнительных грузов, а также использованием механических и гидравлических догрузателей [3]. Увеличение эксплуатационной массы трактора с помощью навесных или монтируемых балластных грузов заводского изготовления производится обычно для догрузки переднего ведущего моста и обеспечения благоприятного распределения эксплуатационной массы трактора при работе с различными сельскохозяйственными машинами. Балластирование трактора путем заливки в шины колес водного раствора используется только в случае недостаточного сцепления колес с почвой в

неблагоприятных условиях (на легких песчаных, переувлажненных почвах и т.д.). Шины, заполненные жидкостью, ухудшают плавность хода трактора на скоростях более 20 км/ч. При наезде на препятствие у таких шин может произойти разрыв их каркаса. Балластирование колесных тракторов «БЕЛАРУС» дает возможность на пахоте снизить удельный расход топлива на 6-7 %. Однако при работе трактора в почвенных условиях с нормальной влажностью и плотностью с почвообрабатывающими машинами с пассивными рабочими органами (плугами, культиваторами, боронами, комбинированными агрегатами) запрещается увеличение эксплуатационной массы трактора для повышения тягового усилия на крюке. Это уменьшит срок службы трактора, приведет к снижению долговечности узлов трансмиссии и ходовой системы. Кроме того, при работе агрегата с дополнительной загрузкой балластными грузами затрачивается определенное количество топлива на их перемещение [4].

Только в некоторой мере можно повысить производительность почвообрабатывающего агрегата за счет повышения мощности колесного трактора «БЕЛАРУС» при его работе в тяговом режиме, но для этого потребуется увеличить его эксплуатационный вес. Увеличение массы сельскохозяйственных тракторов приводит также к повышению расхода энергии на дополнительное рыхление почвы в связи с большим ее уплотнением, нарушающим условия роста и развития культурных растений, снижающим их урожайность.

Дальнейшее повышение мощности колесного трактора класса 5 при работе в тяговом режиме невозможно, так как требует увеличения его эксплуатационного веса, в то время как уже сейчас нагрузка на почву достигла предельного значения. Осевая нагрузка трактора превышает нагрузку, регламентируемую стандартами, даже на дороге с твердым покрытием [5, 6].

Повысить эффективность использования энергонасыщенных тракторов при их работе в составе почвообрабатывающих агрегатов удастся повышением тягово-сцепных свойств трактора и снижением давления на почву за счет установки сдвоенных колес, но при этом снижается маневренность агрегата, повышаются нагрузки на ходовую систему трактора, особенно на разворотах и движении по неровностям. Влияние сдвояния колес на тяговую динамику трактора на рыхлом фоне проявляется следующим образом. В зоне номинальных тяговых усилий и при малых скоростях буксование снижается в среднем в 1,4 раза и повышается тяговая мощность. При работе с малым тяговым усилием на крюке и на больших скоростях тяговая мощность трактора со сдвоенными колесами меньше, чем на одинарных колесах из-за повышенного сопротивления качению. Сдвояние передних колес рекомендуется использовать только в исключительных случаях, при недостаточных сцепных условиях и на переувлажненных почвах.

Можно сделать вывод о том, что дальнейшее развитие мобильной сельскохозяйственной техники на той же энергетической базе и на тех же технологиче-

ских принципах еще способно увеличить производительность, но ценой все больших и больших затрат [2].

Повышение эксплуатационных показателей энергонасыщенных колесных тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов за счет установки двойных колес, балластирования, увеличения веса трактора происходит, главным образом, из-за снижения буксования движителей, что влечет снижение неэффективных потерь мощности.

Повышение энергонасыщенности тракторов и развитие машинных технологий возделывания сельскохозяйственных культур привело к опережению роста массы технологической части машинно-тракторного агрегата относительно роста массы трактора. С применением комбинированных агрегатов масса технологической части агрегата сравнялась с массой энергетической части. В будущем можно прогнозировать, что масса технологической части агрегата будет превосходить массу энергетической [7].

Применяемые для агрегатирования с тракторами класса 5 оборотные плуги, машины для предпосевной обработки почвы, посева зерновых культур имеют большую ширину захвата, большую массу и состоят из нескольких секций [7]. Например, основная секция оборотного плуга навешивается между трактором и опорной тележкой, а дополнительная секция плуга – на опорную тележку. Плуг и тележка имеют значительную массу. Масса плуга ППО-8-40К составляет примерно 5500 кг, ППО.8.30/45 – 6400 кг, ППО-(6+4)-40/45 – 7070 кг [4].

Рост энергонасыщенности сельскохозяйственных тракторов требует разработки новых схем построения агрегатов. Рациональное использование возрастающих мощностей тракторов на обработке почвы можно реализовать передачей «избыточной» мощности на привод промежуточных тягово-прицепных модулей или опорных ведущих колес сельскохозяйственных машин [2]. В этом случае будет использоваться масса агрегата для создания тягового усилия, что позволит увеличить производительность, рассредоточить сцепную массу по движителям, снизить удельную энергоёмкость работ и уплотнение почвы [6].

Целью работы является повышение эксплуатационных показателей работы почвообрабатывающих машин за счет рационального распределения тягового сопротивления между модулями мобильного энергетического средства.

Основная часть

Перспективное направление для использования высокоэнергонасыщенных тракторов «БЕЛАРУС» на обработке почвы открывает модульная схема построения агрегата на основе мобильного энергетического средства (МЭС) [1; 8, 9, 10]. Так, на пахоте эта схема включает энергетический модуль (источник энергии, в качестве которого используется трактор) и технологический модуль, получающий привод от энергетического модуля. Между модулями навешивается рабочая машина – плуг. Технологический модуль – это

приспособление в виде опорной тележки. Привод колес технологического модуля осуществляется от двигателя трактора посредством гидравлической системы с регулируемым аксиально-поршневым насосом («БЕЛАРУС-3522») или электрической системы («БЕЛАРУС-3023» с электромеханической бесступенчатой трансмиссией). В таком агрегате тяговое усилие будет создаваться как энергетическим, так и технологическим модулями. Масса технологического модуля используется для создания дополнительной силы тяги трактора. При этом только часть мощности двигателя трактора будет реализовываться через его ходовую систему, и его удельная материалоемкость может быть снижена.

В зависимости от соотношения сцепных весов трактора и технологического модуля может быть обеспечен прирост тягового усилия от 50 до 100 %. Энергонасыщенность тракторов в таком агрегате можно повысить в 1,5...2 раза в сравнении с агрегатами, построенными по традиционной схеме [6].

Производительность выполняемого технологического процесса будет зависеть от распределения тягового сопротивления почвообрабатывающей машины между энергетическим и технологическим модулями мобильного энергетического средства при работе агрегата. Тогда тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины P будет равно

$$P = F_T + F_M, \quad (2)$$

где F_T, F_M – тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины преодолеваемое, соответственно, энергетическим и технологическим модулями, Н.

Доля тягового сопротивления почвообрабатывающей машины, приходящаяся на энергетической модуль, составит

$$\varepsilon_T = \frac{F_T}{P} = \frac{F_T}{F_T + F_M}. \quad (3)$$

Тогда тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины, преодолеваемое энергетическим и технологическим модулями, соответственно, могут быть представлены

$$F_T = \varepsilon_T P, \quad (4)$$

$$F_M = \varepsilon_M P = (1 - \varepsilon_T) P, \quad (5)$$

где ε_M – доля тягового сопротивления почвообрабатывающей машины, приходящаяся на технологический модуль.

В процессе работы почвообрабатывающего агрегата всегда обеспечивается равенство

$$\varepsilon_T + \varepsilon_M = 1. \quad (6)$$

В качестве критерия оптимизации распределения тягового сопротивления почвообрабатывающей машины между модулями принимаем минимум потерь мощности на буксование движителей мобильного энергетического средства. Величина буксования ведущих колес сельскохозяйственных агрегатов характеризуется отношением потерянной скорости поступательного движения к возможному ее теоретическому значению. Буксование колесных тракторов при их работе с широкозахватными почвообрабатывающими

машинами, в частности, с оборотными плугами существующих конструкций, достигает до 20 % и более. Особенно повышенное буксование наблюдается у скоростных энергонасыщенных тракторов, что снижает эффективность использования их потенциальных возможностей при работе на почвах с высоким удельным сопротивлением, а также на почвах влажных и рыхлых. При этом из-за буксования теряется часть мощности, передаваемой от двигателя энергетического средства через трансмиссию к движителям.

Проанализируем потери мощности на буксование N_{δ} при работе почвообрабатывающего агрегата, имеющего приводные опорные колеса технологического модуля, у которого и вес рабочей машины используется для создания касательной силы тяги. Величина теряемой мощности N_{δ} в агрегате, построенном по модульной схеме, пропорциональна величине буксования движителей энергетического и технологического модулей и определяется по уравнению

$$N_{\delta} = N_{\delta_T} + N_{\delta_M} = (F_T + G_T f_T) \frac{v \delta_T}{1 - \delta_T} + (F_M + G_M f_M) \frac{v \delta_M}{1 - \delta_M}, \quad (7)$$

где N_{δ_T} , N_{δ_M} – потери мощности на буксование движителей, соответственно, энергетического и технологического модулей, Вт;

G_T , G_M – сцепной вес, соответственно, энергетического и технологического модулей, Н;

f_T , f_M – коэффициент сопротивления качению, соответственно, энергетического и технологического модулей;

δ_T , δ_M – буксование движителей, соответственно, энергетического и технологического модулей.

Достаточно полно результаты тяговых испытаний тракторов «БЕЛАРУС» в пределах буксования движителей 0,05-0,15 можно аппроксимировать линейным уравнением. Тогда

$$\delta_T = a_T \frac{F_T}{G_T} = a_T \frac{P \varepsilon_T}{G_T}, \quad (8)$$

$$\delta_M = a_M \frac{F_M}{G_M} = a_M \frac{P(1 - \varepsilon_T)}{G_M}, \quad (9)$$

где a_T , a_M – постоянный безразмерный коэффициент, определяемый по результатам тяговых испытаний, соответственно, энергетического и технологического модулей.

Потери мощности на буксование агрегата в зависимости от доли тягового усилия энергетического модуля определяются выражением

$$N_{\delta} = (P \varepsilon_T + G_T f_T) v \frac{a_T \frac{P \varepsilon_T}{G_T}}{1 - a_T \frac{P \varepsilon_T}{G_T}} +$$

$$+ (P(1 - \varepsilon_T) + G_M f_M) v \frac{a_M \frac{P(1 - \varepsilon_T)}{G_M}}{1 - a_M \frac{P(1 - \varepsilon_T)}{G_M}}. \quad (10)$$

Функция $N_{\delta} = f(\varepsilon_T)$ имеет экстремум, когда возникает минимум потерь мощности на буксование при заданном тяговом сопротивлении почвообрабатывающей машины. Выражение первой производной по ε_T имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\delta}}{d\varepsilon_T} = & \frac{P^2 v a_T \varepsilon_T}{G_T \left(1 - \frac{a_T P \varepsilon_T}{G_T}\right)} + \frac{(P v \varepsilon_T + G_T f_T v) a_T P}{G_T \left(1 - \frac{a_T P \varepsilon_T}{G_T}\right)} + \\ & + \frac{(P \varepsilon_T v + G_T f_T v) a_T^2 P^2 \varepsilon_T}{G_T^2 \left(1 - \frac{a_T P \varepsilon_T}{G_T}\right)^2} - \frac{P^2 v a_M (1 - \varepsilon_T)}{G_M \left(1 - \frac{a_M P (1 - \varepsilon_T)}{G_M}\right)} - \\ & - \frac{(P v (1 - \varepsilon_T) + G_M f_M v) a_M P}{G_M \left(1 - \frac{a_M P (1 - \varepsilon_T)}{G_M}\right)} - \\ & - \frac{(P(1 - \varepsilon_T) v + G_M f_M v) a_M^2 P^2 (1 - \varepsilon_T)}{G_M^2 \left(1 - \frac{a_M P (1 - \varepsilon_T)}{G_M}\right)^2}. \quad (11) \end{aligned}$$

Приравняв выражение (11) к нулю и решая относительно ε_T , получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_T = & - \frac{1}{\left(a_M G_M^2 f_M a_T^2 - a_M^2 G_T^2 + a_T^2 G_M^2 - a_T G_T f_T a_M^2\right) P} \times \\ & \times \left[-a_T G_T f_T G_M a_M + a_M^2 P G_T + a_T G_T f_T a_M^2 P - a_M G_T G_M - \right. \\ & - a_T G_M^2 - a_M G_M^2 f_M a_T - (-2a_T^2 G_T f_T a_M^3 P G_M^2 f_M + \\ & + a_T G_T^2 f_T G_M^2 a_M^2 + 2a_T^2 G_T f_T G_M^3 a_M - 2a_M^2 P G_T a_T G_M^2 + \\ & + 2a_M^2 G_T G_M^3 f_M a_T + a_M G_M^4 f_M a_T^3 f_T - 2a_M^2 G_M^3 f_M a_T^2 P + \\ & + a_M^3 G_M^2 f_M a_T^2 P^2 + a_T^3 G_M^2 f_T a_M^2 P^2 - 2a_T^3 G_M^3 f_T a_M P + \\ & + a_M^2 G_T^2 G_M^2 + a_T^3 G_M^4 f_T + 2a_M G_T G_M^3 a_T + a_T^2 G_M^4 a_M f_M + \\ & + a_M^3 G_T^2 G_M^2 f_M - 2a_T^2 G_M^3 a_M P + a_T^2 G_M^2 a_M^2 P^2 + a_T^2 G_M^4 + \\ & + 2a_T^2 G_T f_T G_M^3 a_M^2 f_M - 2a_M^3 P G_T G_M^2 f_M a_T - \\ & - 2a_T^2 G_T f_T a_M^2 P G_M^2 + a_M^3 G_M^2 f_M a_T^3 P^2 - \\ & \left. - 2a_M^2 G_M^3 f_M a_T^3 f_T P + a_T G_T^2 f_T a_M^3 G_M^2 f_M\right]^{0.5} G. \quad (12) \end{aligned}$$

В пахотном агрегате на основе МЭС энергетический и технологический модули работают в одинаковых почвенных условиях. Тогда можно предполо-

жить, что $f_T = f_M = f$ и $a_T = a_M = a$. Доля тягового усилия энергетического модуля в тяговом сопротивлении почвообрабатывающей машины при минимуме потерь мощности на буксование будет равна

$$\varepsilon_T = \frac{G_T}{G_T + G_M}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (12) в формулы (4) и (5), можно получить формулы для определения тяговых усилий энергетического и технологического модулей в агрегате, построенном по модульной схеме. Для пахотного агрегата формулы (4) и (5) примут вид

$$F_T = P \frac{G_T}{G_T + G_M}; \quad (14)$$

$$F_M = P \frac{G_M}{G_T + G_M}. \quad (15)$$

Величина буксования движителей энергетического и технологического модулей определяется после подстановки выражения (13) в (8) и (9)

$$\delta_T = \delta_M = a \frac{P}{G_T + G_M}. \quad (16)$$

Заключение

Таким образом, перспективным направлением для использования высокоэнергонасыщенных тракторов «БЕЛАРУС» является модульная схема построения почвообрабатывающего агрегата. Тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины в таком агрегате должно распределяться между энергетическим и технологическими модулями пропорционально доли их сцепных весов в общем сцепном весе, что обеспечит повышение эксплуатационных показателей работы за счет минимума потерь мощности на буксование движителей.

Передавая часть мощности двигателя энергетического средства на привод колес технологического модуля можно повышать мощность трактора или снижать его вес, что будет способствовать повышению эффективности технологического процесса обработки почвы и повышению производительности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подскребко, М.Д. Проблемы совершенствования почвообрабатывающих агрегатов с энергонасы-

щенными тракторами / М.Д. Подскребко // Агропанорама. – 1997. – № 1. – С. 13-15.

2. Мисуно, О.И. Производительность плуга, агрегатируемого с МЭС на базе трактора «БЕЛАРУС 2022» / О.И. Мисуно // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2019», Минск, 6-7 июня 2019 г. / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск, БГАТУ, 2019. – С. 337-343.

3. Кузнецов, Е.Е. Дополнительные догружающие устройства в ходовой системе МЭС / Е.Е. Кузнецов, О.А. Кузнецова // Сельский механизатор. – 2015. – № 6. – С. 9-11.

4. Мисуно, О.И. Снижение потерь мощности на буксование колесного трактора на пахоте / О.И. Мисуно // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21-23 ноября 2018 г. – Минск, 2018. – С. 229-231.

5. Кутьков, Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов / Г.М. Кутьков // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 5. – С. 11-14.

6. Кутьков, Г.М. Конструктивные параметры широкозахватных МТА на основе МЭС / Г.М. Кутьков, В.Т. Надыкто, Е.В. Габай // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. – № 4. – С. 12-16.

7. Лепешкин, Н.Д. Основные направления развития механизации обработки почвы и посева в Республике Беларусь до 2030 года / Н.Д. Лепешкин, А.А. Точицкий, В.В. Мижурин, Д.В. Заяц // Механизация и электрификация сельского хозяйства: выпуск 51. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 10-15.

8. Перспективные мобильные энергетические средства (МЭС) для сельскохозяйственного производства / В.В. Кацыгин [и др.]. – Минск.: Наука и техника. – 1982. – 272 с.

9. Экспериментальные исследования мобильного энергетического средства МЭС-330 «Автотрактор» на пахоте / В.В. Адамчук [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: выпуск 51. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 25-28.

10. Надыкто, В.Т. Снижение энергозатрат пахотными МТА на основе МЭС / В.Т. Надыкто // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1996. – № 10. – С. 8-11.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.12.2022