

УДК 629.3.014

Ч.И. ЖДАНОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры «Тракторы»¹

E-mail: chzhdanovich@mail.ru

Н.В. КАЛИНИН

старший научный сотрудник НТЦ «Сельскохозяйственное машиностроение»²

E-mail: knv9041986@rambler.ru

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.07.2022.

ВЫБОР ДИАПАЗОНА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА

Разработана методика выбора передаточного отношения механической части трансмиссии для работы на сельскохозяйственных операциях трактора 5-го тягового класса, оборудованного электромеханической трансмиссией с тяговым асинхронным электродвигателем. Предполагается наличие двух передач: высшей (n -й) для работы на транспортном режиме и низшей ($n-1$ -й) для работы на рабочем и технологическом режимах. Передаточное отношение МЧТ $u_{\text{МЧТ},n}$, соответствующее n -й передаче, определяется из условия обеспечения требуемой максимальной скорости движения трактора. Передаточное отношение МЧТ $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$, соответствующее $n-1$ -й передаче, должно находиться в пределах от $u_{\text{МЧТ}(n-1),p}$, при котором минимальная скорость пахоты будет обеспечена при номинальном значении частоты напряжения, подаваемого на ТАД, до $u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}}$, определяемого из условия обеспечения максимально возможного диапазона скоростей трактора только n -й передачей без перекрытия его $n-1$ -й передачей. Также предложена формула определения значения $u_{\text{МЧТ}(n-1),v}$, при котором трактор может работать на максимальной скорости, допустимой для заданной сельскохозяйственной операции. Если $u_{\text{МЧТ}(n-1),v} < u_{\text{МЧТ}(n-1)} < u_{\text{МЧТ}(n-1),p}$, то весь диапазон скоростей для заданной сельскохозяйственной операции будет обеспечен при работе на $n-1$ -й передаче. С целью определения $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$ с наилучшим тяговым КПД предлагается проводить тяговый расчет трактора для значений $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$, взятых в диапазоне от $u_{\text{МЧТ}(n-1),p}$ до $u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}}$ с определенным шагом. После для выбранного значения $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$ необходимо выполнить расчет потерь ТАД при работе трактора во всем диапазоне скоростей, обеспечиваемых $n-1$ -й передачей. Если тепловой режим ТАД не выполняется при движении трактора на малых скоростях на $n-1$ -й передаче, то необходимо либо взять большее значение $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$, при котором он выполняется, либо в случае небольшого превышения значения допустимых потерь мощности ТАД не увеличивать $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$, а учесть это при проектировании системы охлаждения ТАД.

Ключевые слова: трактор, тяговый асинхронный электродвигатель, передаточное отношение, механическая часть трансмиссии, электромеханическая трансмиссия, сила тяги на крюке, буксование, теоретическая скорость, действительная скорость, тяговый КПД

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-52-60>

Введение. В [1] предложена методика выбора передаточных отношений $u_{\text{МЧТ}}$ механической части трансмиссии (МЧТ) колесного трактора, обеспечивающая минимальное количество передач, а в [2] был проведен расчет с выбранными по [1] значениями $u_{\text{МЧТ}}$, подтверждающий, что количество подобранных по методике [1] передач и значения $u_{\text{МЧТ}}$ позволяют обеспечить требуемый момент на колесах трактора во всем диапазоне скоростей движения. Расчеты по методике [1] показывают, что можно использовать только

две передачи: высшую (n -ю) для работы на транспортном режиме и низшую ($n-1$ -ю) для других операций вместо трех-четырех в [3, 4] и благодаря этому уменьшить количество зубчатых зацеплений в МЧТ на одно, повысив КПД МЧТ и упростив конструкцию трансмиссии трактора.

Однако расчет тягового КПД трактора η_T , проведенный по методике [5, 6], и графики в [7] показывают, что тяговый КПД η_T на отдельных участках либо на всей тяговой характеристике трактора может быть несколько выше при меньших значе-

ниях $u_{\text{МЧТ}}$, чем $u_{\text{МЧТ}}$ n -1-й передачи, определенное по [1].

Цель работы — определить диапазон значений передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора, которые можно использовать для низшей передачи, обеспечивая минимальное количество передач, максимальный тяговый КПД и работу трактора на всех режимах без перегрева тягового асинхронно-го электродвигателя (ТАД).

Выбор n -1-й передачи $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$. Согласно [1, 2], одной высшей (n -й) передачи, передаточное отношение $u_{\text{МЧТ},n}$ которой определяется по [1], для колесного трактора недостаточно, поскольку она не обеспечит работу трактора на пахоте с максимально допустимым значением силы тяги на крюке на номинальном режиме работы ТАД.

Определим минимальное передаточное отношение МЧТ $u_{\text{МЧТ},\phi}$, при котором будет обеспечен момент на колесах трактора по сцеплению M_ϕ при заданном коэффициенте сцепления $\phi_{\text{ц}}$ колес с опорной поверхностью или соответствующей силе тяги на крюке $F_{\text{кр}}$ при допустимом буксовании $\delta_{\text{доп}}$ [5]. Регулирование ТАД осуществляется в диапазоне частот от минимальной $f_{1,\text{min}}$ до максимальной $f_{1,\text{max}}$; аналогично [8], диапазон регулирования ТАД делится на три участка: от номинальной частоты $f_{1,n}$ до $f_{1,\text{max}}$, от некоторой частоты $f_{1,\text{lim}}$ до $f_{1,n}$ и от $f_{1,\text{min}}$ до $f_{1,\text{lim}}$ [8]. Зависимости для определения необходимых параметров ТАД приведены в [5, 8–10]. Момент на колесах трактора M_k , силу тяги F_k можно рассчитать по [5], определив момент ТАД по [5] или [8, 10–12].

Допустимый момент ТАД $M_{\text{ТАД},\text{цп}}$, соответствующий M_ϕ , определяется по формуле [5]:

$$M_{\text{ТАД},\text{цп}} = \frac{M_\phi}{u_{\text{МЧТ}} \cdot \eta_{\text{МЧТ}} \cdot \eta_\gamma}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{МЧТ}}$ — КПД механической части трансмиссии; η_γ — КПД, учитывающий трение в шинах.

Выразим из формулы (1) $u_{\text{МЧТ}}$ при номинальном моменте ТАД $M_{\text{ТАД},n}$. Это и будет $u_{\text{МЧТ},\phi}$ — формула (2). Номинальный момент $M_{\text{ТАД},n}$ — это момент при $f_1 = f_{1,n}$ и $s = s_n$ (s — скольжение ТАД; s_n — номинальное скольжение ТАД; f_1 — частота напряжения, подаваемого на ТАД) [8]:

$$u_{\text{МЧТ},\phi} = \frac{M_\phi}{M_{\text{ТАД},n} \cdot \eta_{\text{МЧТ}} \cdot \eta_\gamma}. \quad (2)$$

Если $u_{\text{МЧТ}} < u_{\text{МЧТ},\phi}$, то при $s \leq s_n$ на колесах не будет обеспечен M_ϕ при $f_1 \geq f_{1,n}$ (рисунок 1, кривая 2). Если $u_{\text{МЧТ}} > u_{\text{МЧТ},\phi}$, то для $s = s_n$ M_ϕ будет обеспечен при некотором значении $f_1 = f_{1,\phi}$ (рисунок 2), где $f_{1,n} < f_{1,\phi} < f_{1,\text{max}}$, а на участке от $f_{1,\phi}$ до $f_{1,n}$ ТАД должен будет работать при $s < s_n$ (то есть не сможет развить номинальный режим) вследствие ограничения по M_ϕ .

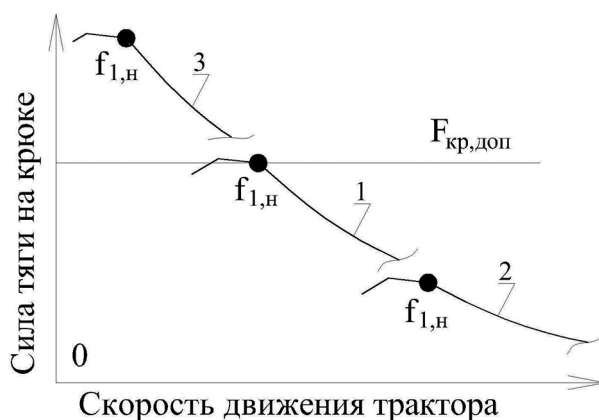


Рисунок 1 — Зависимости $F_{\text{кр}}(v_{\text{д}})$ для различных значений $u_{\text{МЧТ}}$ при $s = s_n$: 1 — $u_{\text{МЧТ}} = u_{\text{МЧТ},\phi}$ ($u_{\text{МЧТ},\phi}$ соответствует M_ϕ , определяемому при силе тяги на крюке $F_{\text{кр},\text{доп}}$); 2 — $u_{\text{МЧТ}} < u_{\text{МЧТ},\phi}$; 3 — $u_{\text{МЧТ}} > u_{\text{МЧТ},\phi}$.
Figure 1 — Dependences of $F_{\text{кр}}(v_{\text{д}})$ for different values of $u_{\text{МЧТ}}$ at $s = s_n$: 1 — $u_{\text{МЧТ}} = u_{\text{МЧТ},\phi}$ ($u_{\text{МЧТ},\phi}$ corresponds to M_ϕ , determined by the drawbar pull $F_{\text{кр},\text{доп}}$); 2 — $u_{\text{МЧТ}} < u_{\text{МЧТ},\phi}$; 3 — $u_{\text{МЧТ}} > u_{\text{МЧТ},\phi}$.

На рисунке 2 показана зависимость $F_{\text{кр}}(v_{\text{д}})$ при $u_{\text{МЧТ}(x)} > u_{\text{МЧТ},\phi}$, где значение $u_{\text{МЧТ},\phi}$ соответствует максимально возможной силе тяги на крюке $F_{\text{кр},\text{доп}(0)}$ при $\delta_{\text{доп}}$, определяемой по кривой буксования для аналогичного трактора массой, равной эксплуатационной массе трактора $m_{\text{э}}$, а $u_{\text{МЧТ}(x)}$ — произвольно взятое передаточное отношение МЧТ n -1-й передачи. На участке CD ТАД работает при $s_{\text{lim},P} \leq s_n$, где $s_{\text{lim},P}$ — скольжение ТАД, которое возможно достичь с учетом ограничения мощности, получаемой ТАД от ДВС при работе без превышения s_n [5]. При отсутствии ограничения по $\delta_{\text{доп}}$ ТАД мог бы обеспечить работу в режиме $s \leq s_n$ на участке $C_T D$, где точка C_T — это такая точка, в которой $f_1 = f_{1,n}$, $U_1 = U_{1,n}$. То есть если увеличить силу тяги до некоторого значения $F_{\text{кр},\text{доп}(T)}$, соответствующего точке C_T (рисунок 3), то ТАД ее сможет

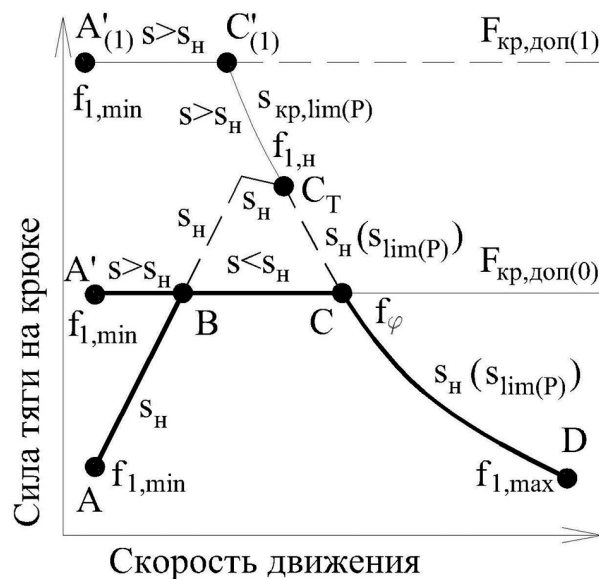


Рисунок 2 — Работа ТАД при различных значениях силы тяги $F_{\text{кр},\text{доп}}$.
Figure 2 — Operation of the TIM at different values of the drawbar pull $F_{\text{кр},\text{доп}}$.

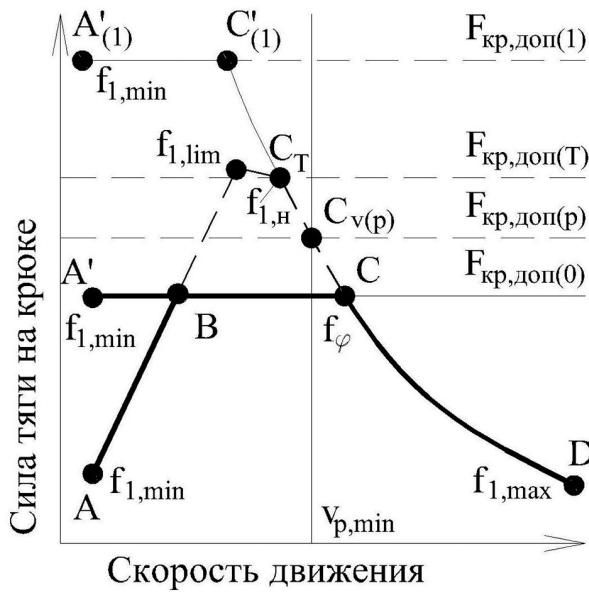


Рисунок 3 — Определение силы тяги $F_{кр,доп}$ при минимальной рабочей скорости движения трактора работе на пахоте
 Figure 3 — Determination of the drawbar pull $F_{кр,доп}$ at the minimum working speed of the tractor plowing

обеспечить в режиме работы $s \leq s_n$. Значение $u_{МЧТ(x)}$ будет соответствовать значению $u_{МЧТ(ф)}$, определяемому при $F_{кр,доп(T)}$, а не при $F_{кр,доп(0)}$. Если увеличить силу тяги $F_{кр}$ еще больше — до некоторого значения $F_{кр,доп(1)}$, то для случая, представленного на рисунках 2 и 3, ТАД в режиме работы $s \leq s_n$ не сможет обеспечить $F_{кр}$ от $F_{кр,доп(T)}$ до $F_{кр,доп(1)}$ при $u_{МЧТ(x)}$; значение $u_{МЧТ(ф)}$, определяемое при $F_{кр,доп(1)}$, станет больше, чем $u_{МЧТ(x)}$. На участке $C'_{(1)}C_T$ при $u_{МЧТ(x)}$ значение s_n будет превышено. Для обеспечения $F_{кр,доп(1)}$ при $s \leq s_n$ нужно либо брать большее значение $u_{МЧТ}$, чем $u_{МЧТ(x)}$, либо вводить дополнительную передачу с $u_{МЧТ} > u_{МЧТ(x)}$.

Увеличение $F_{кр,доп}$ выше $F_{кр,доп(0)}$ без увеличения $\delta_{доп}$ можно достичь увеличением массы трактора.

Однако увеличение $F_{кр}$ от $F_{кр,доп(0)}$ до $F_{кр,доп(1)}$ возможно только при уменьшении скорости трактора v_T (v_d) из-за ограничения по максимальной мощности ДВС $P_{e,max}$: на рисунке 2 видно, что чем больше будет увеличиваться $F_{кр,доп}$, тем меньше будет максимально возможная скорость трактора, соответствующая $F_{кр,доп}$; значение максимальной скорости v_T (v_d) при $F_{кр,доп(1)}$ существенно ниже, чем при $F_{кр,доп(0)}$. Есть смысл увеличивать $F_{кр,доп}$ для работы на пахоте путем догрузки трактора только до значения $F_{кр,доп(p)}$ (см. рисунок 3), которое можно обеспечить при $v_d = v_{p,min}$, где $v_{p,min}$ — минимально допустимая действительная скорость v_d движения трактора при работе на пахоте с агрегируемым плугом. Далее догружать трактор уже не имеет смысла, поскольку большее значение $F_{кр,доп}$ будет обеспечено при $v_d < v_{p,min}$. Если $F_{кр,доп(T)} \geq F_{кр,доп(p)}$, то это значит, что работа трактора на пахоте полностью обеспечивается на номинальном режиме работы ТАД при выбранном $u_{МЧТ}$. Для случая, представленного на рисунках 2

и 3, значение $F_{кр,доп}$, соответствующее $v_{p,min}$, при $u_{МЧТ(x)}$ обеспечивается.

Обозначим как $u_{МЧТ(p)}$ передаточное отношение МЧТ, при котором скорость трактора будет равна $v_{p,min}$, если для ТАД $s = s_n$ и $f_1 = f_{1,n}$.

Найдем $u_{МЧТ(p)}$, подставив в формулу определения $u_{МЧТ,n}$ [1, (1)] $f_{1,n}$ и $v_{p,min,T}$, где $v_{p,min,T}$ — теоретическая скорость v_T , соответствующая действительной скорости $v_{p,min}$:

$$u_{МЧТ(p)} = \frac{7,2 \cdot \pi \cdot f_{1,n} \cdot r_d}{v_{p,min,T} \cdot p_1} (1 - s_n), \quad (3)$$

где p_1 — число пар полюсов ТАД; r_d — динамический радиус колеса трактора; аналогично [5], вся масса трактора приведена к задним колесам, коэффициент динамического несоответствия передних и задних колес [13] принят равным нулю.

Если $u_{МЧТ(n-1)} \geq u_{МЧТ(p)}$, то $v_{p,min}$ обеспечивается при $f_1 > f_{1,n}$. Если $u_{МЧТ(n-1)} < u_{МЧТ(p)}$, то $v_{p,min}$ будет обеспечена только при $f_1 < f_{1,n}$.

Если при $u_{МЧТ(n-1)} \geq u_{МЧТ(p)}$ трактор не может развить $F_{кр,доп(p)}$ на скорости $v_{p,min}$, имея запас по буксованию, то возможны три случая: использован недостаточно мощный ТАД, не хватает мощности ДВС, недостаточно мощности всей установки. Если $s = s_n < s_{кр,lim,P}$ ($s_{кр,lim,P}$ — скольжение ТАД, определяемое с учетом ограничения мощности, получаемой ТАД от ДВС и не превышающее критическое скольжение ТАД [5]) и мощность ДВС P_e меньше максимальной мощности ДВС $P_{e,max}$, то недостаточно мощный ТАД; чтобы развить s_n , ТАД нужна меньшая мощность, чем он может получить от ДВС, а забрав всю мощность, он превысит s_n . Если $s = s_{lim,P} = s_{кр,lim,P} < s_n$ и $P_e = P_{e,max}$, то это значит, что трактору не хватает мощности ДВС: поглотив всю мощность, которую ему может передать ДВС, ТАД не сможет развить даже s_n . Если $s \approx s_n \approx s_{кр,lim,P}$ и $P_e \approx P_{e,max}$, то не хватает мощности силовой установки, включающей в себя ДВС и ТАД.

Согласно [14], трактор 5-го класса 35 % времени работает на пахоте, 10 % времени производит сев, 10 % — культивацию. Требуемая скорость: 7–9 км/ч — для плугов ППО-9-45К [15] и ПН-8-35У [16], 7–10 км/ч — для плуга ПО-8 [17], 7–13 км/ч — для плуга ППО-8РК [18], до 18 км/ч — с посевным агрегатом АППМ-6 [19], 8–10 км/ч — для культиватора КП-9 [20]. То есть $v_{p,min}$ для культивации не меньше $v_{p,min}$ для работы с плугом, а при работе на севе может быть необходимость даже использовать n -ю передачу, чтобы обеспечить более высокую скорость (порядка 18 км/ч). Для минимальной работы с плугом $v_d = 7$ км/ч трактор при $\delta_{доп} = 16$ % должен развивать $v_T = 8,33$ км/ч. Берем $v_{p,min,T} = 8,33$ км/ч и получаем $u_{МЧТ(p)} = 62,74$ по формуле (3).

В [3, 4] рекомендуется брать только частотный диапазон ТАД трактора от $f_{1,n}$ до $f_{1,max}$, в то время как по методике [1] для участка работы на n -й пе-

редаче без перекрытия ее $n-1$ -й передачей также может быть использована часть участка ТАД от $f_{1,\text{lim}}$ до $f_{1,n}$. Определим, чему будет равно $u_{\text{МЧТ}(n-1),ч}$ при полном использовании только частотного диапазона от $f_{1,n}$ до $f_{1,\text{max}}$ на n -й передаче трактора на участке без перекрытия ее $n-1$ -й передачей. Для этого теоретическая скорость $v_T(f_{1,n})$, соответствующая $f_{1,n}$ при включенной передаче $u_{\text{МЧТ},n}$, должна быть равна теоретической скорости трактора при работе на передаче $u_{\text{МЧТ},n-1}$ при $f_1 = f_{1,\text{max}}$. По формуле [5] определения теоретической скорости $v_T(f_{1,n})$ при $u_{\text{МЧТ},n}$ равна:

$$v_T(f_{1,n}) = \frac{7,2 \cdot \pi \cdot f_{1,n} \cdot r_d}{u_{\text{МЧТ},n} \cdot P_1} (1 - s_n). \quad (4)$$

Подставим в формулу [1, (1)] определения $u_{\text{МЧТ},n}$ вместо $v_{T,\text{max}}$ значение $v_T(f_{1,n})$, найденное по формуле (4), и получим формулу (5) для определения $u_{(n-1),ч}$:

$$u_{\text{МЧТ}(n-1),ч} = \frac{7,2 \cdot \pi \cdot f_{1,\text{max}} \cdot r_d}{v_T(f_{1,n}) \cdot P_1} (1 - s_n). \quad (5)$$

Подставим формулу (4) в (5) и получим формулу (6), которая будет справедлива при $s = s_n$:

$$u_{\text{МЧТ}(n-1),ч} = \frac{f_{1,\text{max}}}{f_{1,n}} u_{\text{МЧТ},n}. \quad (6)$$

При $u_{\text{МЧТ},n} = 33,25$ [3, 4] $u_{\text{МЧТ}(n-1),ч} = 82,0$.

При $u_{\text{МЧТ},n} = 35,57$ [1, 2] $u_{\text{МЧТ}(n-1),ч} = 87,7$.

Максимально возможным передаточное отношение $n-1$ -й передачи $u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}}$ будет то, которое определено по методике [1]. При $u_{\text{МЧТ}(n-1)} > u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}}$ для определенного диапазона скоростей, обеспечиваемого только n -й передачей, при снижении скорости движения момент при $s = s_n$ также будет падать, что приведет к неустойчивому движению трактора [1, 2]. Для рассматриваемого трактора $u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}} = 103$ согласно [1, 2].

Чтобы определить минимальное передаточное отношение МЧТ $u_{\text{МЧТ}(n-1),v}$ при котором трактор может работать на какой-либо операции на максимальной теоретической скорости $v_{p,\text{max},T}$, допустимой для данной операции, в формулу [1,(1)] определения $u_{\text{МЧТ},n}$ подставим значение скорости $v_{p,\text{max},T}$ и получим формулу (7):

$$u_{\text{МЧТ}(n-1),v} = \frac{7,2 \cdot \pi \cdot f_{1,\text{max}} \cdot r_d}{v_{p,\text{max},T} \cdot P_1} (1 - s_n). \quad (7)$$

Если $u_{\text{МЧТ}(n-1)} \leq u_{\text{МЧТ}(n-1),v}$ то работа на $n-1$ -й передаче со скоростью $v_{p,\text{max},T}$ на данной операции будет возможна. Для пахоты максимальную действительную скорость примем 12 км/ч. Расчеты для передач по [5] показывают, что при максимально возможном значении $F_{\text{кр}}$ из-за ограничения по P_{emax} действительную скорость при $v_d = 12$ км/ч

трактор развивает с $\delta \approx 4\%$ и $v_T = 12,58$ км/ч. Подставив в (7) $v_{p,\text{max},T} = 12,58$ км/ч, получим, что $u_{\text{МЧТ}(n-1),v} = 102,07$. Для сева при скорости 18 км/ч $u_{\text{МЧТ}(n-1),v} = 71,33$.

Таким образом, передаточное отношение $n-1$ передачи $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$ должно быть в пределах от $u_{\text{МЧТ}(p)}$ до $u_{\text{МЧТ}(n-1),\text{max}}$. Если при этом также выполняется условие $u_{\text{МЧТ}(n-1)} \leq u_{\text{МЧТ}(n-1),v}$ для значения $u_{\text{МЧТ}(n-1),v}$ соответствующего максимальной скорости пахоты, то весь диапазон скоростей работы трактора на пахоте обеспечивается на работе при передаче с $u_{\text{МЧТ}(n-1)}$ без переключения на n -ю передачу.

Работа на транспортном режиме, бульдозерных и погрузочных работах и вопрос целесообразности $n-2$ передачи. В [3, 4] рекомендуется для ТАД использовать диапазон частот от $f_{1,n}$ до $f_{1,\text{max}}$, чтобы ТАД трактора и ДВС могли работать в режиме постоянной мощности. Однако, как видно по рисунку 1, для $u_{\text{МЧТ}} > u_{\text{МЧТ},\phi}$ характеристику при $s = s_n$ или ее часть невозможно реализовать, не превысив $F_{\text{кр,доп}}$. На малых скоростях движения трактора есть ограничение по сцеплению, поэтому с уменьшением скорости ниже определенного значения будут уменьшаться также мощность ДВС P_e и мощность ТАД. В [5] на графиках это показано: при скорости ниже примерно 6,4 км/ч при $F_{\text{кр}} = F_{\text{кр,доп}}$ P_e снижается вместе с v_d , выше 6,4 км/ч мощность P_e постоянна и равна максимальной мощности ДВС $P_{e\text{max}}$.

Трактор 5-го класса должен обеспечить также работу на транспортном режиме (35 % времени) и выполнять бульдозерные и погрузочные работы (10 % времени) [14]. Бульдозерные работы выполняются при скорости 2,5–4 км/ч [2, 21].

Для работы трактора на транспортном режиме и при бульдозерных работах будем определять допустимый момент M_k не по $F_{\text{кр}}$ для принятого значения $\delta_{\text{доп}}$ для кривой буксования, а по $\phi_{\text{сц}}$ аналогично [2]. Для колесного трактора примем предельно допустимое значение $\phi_{\text{сц}} = 0,8$ [13, с. 150]. В настоящее время ДВС мощностью 223 кВт устанавливается на трактор BELARUS-3022, эксплуатационная масса которого составляет 11 500 кг [22], в то время как на разрабатываемый трактор «БЕЛАРУС-3023» [3, с. 82] устанавливался ДВС 220 кВт при эксплуатационной массе 12 500 кг. Для трактора BELARUS-3522, выпускаемого в настоящее время, эксплуатационная масса составляет 12 300 кг при мощности ДВС 268 кВт [23]. То есть, по-видимому, силовой установки с ДВС мощностью 220–223 кВт и подобранным под него ТАД оказалась недостаточно для трактора массой 12 500 кг. Для трактора с массой 11 500 кг аналогично BELARUS-3022 [22] и при $\phi_{\text{сц}} = 0,8$ определим M_ϕ , а затем $u_{\text{МЧТ},\phi}$. Получим, что $u_{\text{МЧТ},\phi} = 78,8$. То есть при $u_{\text{МЧТ},\phi} \geq 78,8$ будет реализован M_ϕ для $\phi_{\text{сц}} = 0,8$ без превышения $M_{\text{ТАД},n}$. Однако при $\phi_{\text{сц}} = 0,8$ $u_{\text{МЧТ},\phi} > u_{\text{МЧТ},p}$, где значение $u_{\text{МЧТ},p} = 62,74$ определялось при $v_d = v_{p,\text{min}} = 7$ км/ч ($v_T = 8,33$ км/ч,

$\delta = 16\%$). То есть для $u_{\text{МЧТ,р}} < u_{\text{МЧТ}} < u_{\text{МЧТ,ф}}$ при M_ϕ будет $s > s_n$, когда $v_d < v_{\text{р,мин}}$.

Расчеты и графики [5] показывают, что при работе на самых малых скоростях ТАД трактора превышает s_n даже для $u_{\text{МЧТ}} > u_{\text{МЧТ,ф}}$ (например, для $u_{\text{МЧТ}} = 103$). Однако имеет ли смысл делать дополнительную передачу? Согласно [14], трактор 5-го класса 35 % времени работает на пахоте, 10 % времени производит сев, 10 % — культивацию, то есть 55 % времени на этих трех операциях, где $v_{\text{р,мин}} \geq 7$ км/ч, 35 % на транспортных операциях и 10 % времени — на бульдозерных и погрузочных работах. На транспортных операциях трактор движется по возможности на n -й передаче, разогнаться до требуемой скорости может на предельном режиме работы ТАД [2], а на $n-1$ -й может двигаться при значительных уклонах, чтобы обеспечить номинальный режим работы ТАД [2]. Согласно [2, 21], скорость бульдозерных работ составляет 2,5–4 км/ч. То есть операции на скорости 2,5–4 км/ч трактор будет выполнять не более 10 % времени, поэтому можно допустить работу трактора с уменьшенным КПД на этих скоростях взамен на уменьшение количества зубчатых зацеплений в механической части трансмиссии и тем самым обеспечения большего значения $\eta_{\text{МЧТ}}$, в результате увеличив тяговый КПД на пахоте, севе, культивации и транспортном режиме.

Для оценки необходимости установки $n-2$ -й передачи необходимо провести расчет потерь ТАД, которые превращаются в тепло. Обозначим как $\Delta P_{\text{н,пик}}$ максимально возможные потери мощности при работе ТАД на номинальном режиме s_n ($s \leq s_n$), а $\Delta P_{\text{А'В,пик}}$ — максимально возможные потери на участке работы трактора, где он может достичь M_ϕ только с превышением s_n . На пахоте ТАД трактора может работать продолжительное время, поэтому режим ТАД при работе трактора на пахоте можно принять типовому режиму S1 по ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 [24], а система охлаждения ТАД трактора должна быть рассчитана на отвод потерь $\Delta P_{\text{н,пик}}$ при работе ТАД продолжительное время. В таком случае если $\Delta P_{\text{А'В,пик}} \leq \Delta P_{\text{н,пик}}$, то система охлаждения ТАД, спроектированная на отвод потерь $\Delta P_{\text{н,пик}}$, сможет обеспечить охлаждение ТАД на всем диапазоне его работы. ГОСТ 2582-2013 [25], который распространяется на тяговые вращающиеся электрические машины мощностью более 300 Вт, дает ссылку на ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 [24].

Проведем расчет для $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ и $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$. На рисунке 4 видно, что $v_T = 8,33$ обеспечивается при номинальном режиме работы ТАД при $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ и $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$, а на малых скоростях движения ТАД номинальный режим работы будет превышен. На малых скоростях для $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ $\Delta P_{\text{А'В,пик}} > \Delta P_{\text{н,пик}}$ (рисунок 5), а если работать на передаче $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$, то условие $\Delta P_{\text{А'В,пик}} \leq \Delta P_{\text{н,пик}}$ будет соблюдаться. Чем больше $u_{\text{МЧТ}}$ — тем меньше потери $\Delta P_{\text{А'В,пик}}$. Однако если окажется тяговый

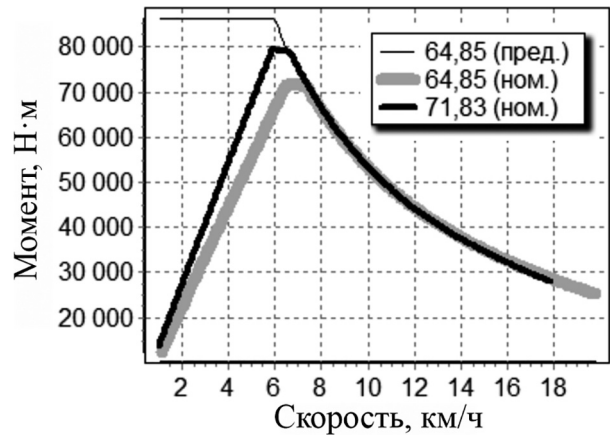


Рисунок 4 — Момент на колесах M_k и теоретическая скорость трактора при работе ТАД на номинальном (ном.) и предельном (пред.) режиме при $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$, на номинальном режиме при $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$, $\phi_{\text{сн}} = 0,8$, работа без компенсатора реактивной мощности [7]

Figure 4 — Torque M_k on the wheels and the theoretical velocity of the tractor when the TIM is operating in nominal (ном.) and limit (пред.) mode at $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$, in nominal mode at $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$, $\phi_{\text{сн}} = 0,8$, operation without a reactive power compensation [7]

КПД максимальным при $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ (как в случае [7]), то что тогда: делать дополнительную передачу $n-2$, конструировать систему охлаждения ТАД трактора в расчете на отвод потерь $\Delta P_{\text{А'В,пик}}$ или же принимать большее $u_{\text{МЧТ}}$ в ущерб тяговому КПД? Увеличение числа передач может потребовать увеличения количества зубчатых зацеплений, что снизит $\eta_{\text{МЧТ}}$, в результате чего тяговый КПД при $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ станет меньше, чем был бы при большем значении $u_{\text{МЧТ}}$ с меньшим числом зубчатых зацеплений, либо приведет к увеличению габаритов коробки передач. Как видно по графику, для $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ $\Delta P_{\text{А'В,пик}}$ незначительно превышает $\Delta P_{\text{н,пик}}$, поэтому можно выполнить расчет системы охлаждения по $\Delta P_{\text{А'В,пик}}$.

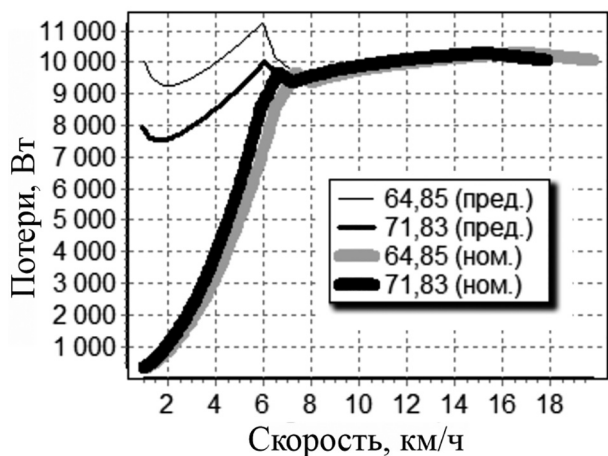


Рисунок 5 — Потери ТАД при работе без компенсатора реактивной мощности [7], соответствующие теоретической скорости трактора v_T для $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ и $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$ для номинального (ном.) и предельного (пред.) режима работы ТАД, $\phi_{\text{сн}} = 0,8$

Figure 5 — TIM losses when operating without a reactive power compensator [7], corresponding to the theoretical velocity of the tractor v_T for $u_{\text{МЧТ}} = 64,85$ and $u_{\text{МЧТ}} = 71,83$ for the nominal (ном.) and limit (пред.) mode of TIM operation, $\phi_{\text{сн}} = 0,8$

Но и это может не потребоваться. Согласно [26, с. 231–232], средняя мощность потерь ΔP_c не должна превышать номинальную. По графикам, приведенным в ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 [24] и, например, в [27], видно, что температура ЭД возрастает не сразу, а постепенно. Для продолжительного режима S1 температура обмоток электродвигателя некоторое время возрастает, а затем остается постоянной; для кратковременного S2 и повторно-кратковременного режима S3 температура возрастает, когда ЭД включен, затем уменьшается, когда ЭД выключен и так далее. Для режимов S9 и S10 нагрузка, основанная на типовом режиме S1, берется как базовая [24] и может быть определенное время превышена. Таким образом, система охлаждения, рассчитанная на $\Delta P_{н,пик.г}$ должна обеспечить отвод потерь ТАД и при $\Delta P_{A'B,пик.г} > \Delta P_{н,пик.г}$ если в предполагаемом цикле работы ТАД ΔP_c не превысит $\Delta P_{н,пик.г}$.

В таблице для разных $u_{MЧТ(n-1)}$ приведены рассчитанные по [1, 5, 9, 10] значения v_T при $f_{1,макс}$ и $f_{1,н}$, $\Delta P_{н,пик.г}$ и $\Delta P_{A'B,пик.г}$. Для $u_{MЧТ} = 64,85 \Delta P_{A'B,пик.г}$ несколько превышает $\Delta P_{н,пик.г}$ при $\varphi_{сц} = 0,8$ и массе трактора 11 500 кг; для $u_{MЧТ} = 71,33$ и более $\Delta P_{A'B,пик.г}$ не превышает $\Delta P_{н,пик.г}$ (см. рисунок 5, таблица).

Выводы. Минимальное $u_{MЧТ(n-1)}$ не должно быть меньше $u_{MЧТ(p)}$, которое определяется исходя из обеспечения $v_{p,мин}$ при $f_1 \geq f_{1,н}$ и при $v_d = v_{p,мин}$ и $f_1 = f_{1,н}$ по формуле (3).

В случае использования полностью или частично диапазона частот регулирования ТАД от $f_{1,лим}$ до $f_{1,н}$ вместе с диапазоном частот от $f_{1,н}$ до $f_{1,макс}$ при работе на n -й передаче максимальное передаточное отношение $u_{MЧТ(n-1),макс}$ находится по [1]. При использовании только диапазона частот от $f_{1,н}$ до $f_{1,макс}$ максимальным $u_{MЧТ(n-1)}$ будет $u_{MЧТ(n-1),ч}$, определяемое по формуле (6).

Если $u_{MЧТ(p)} > u_{MЧТ(n-1),макс}$ ($u_{MЧТ(p)} > u_{MЧТ(n-1),ч}$), то $n-1$ -я передача не обеспечит работу на минималь-

ных скоростях $v_{p,мин}$ — нужна будет, как минимум, еще $n-2$ -я передача.

Определяется $u_{MЧТ(n-1),v}$ при $f_{1,макс}$ и максимальной скорости работы на операции по (7). Для трактора 5-го класса это можно выполнить для работы на пахоте ($u_{MЧТ(n-1),v,п}$) и севе. Если $u_{MЧТ(n-1),v} \leq u_{MЧТ(n-1)} \leq u_{MЧТ(p)}$, то весь диапазон скоростей на заданной операции можно обеспечить на $n-1$ -й передаче.

В случае соблюдения условия $u_{MЧТ(p)} < u_{MЧТ(n-1),макс}$ ($u_{MЧТ(p)} < u_{MЧТ(n-1),ч}$) $u_{MЧТ(n-1)}$ выбирается из диапазона $u_{MЧТ(p)} \leq u_{MЧТ(n-1)} \leq u_{MЧТ(n-1),макс}$ ($u_{MЧТ(n-1),ч}$) исходя из обеспечения максимального тягового КПД трактора. При этом лучшим будет случай $u_{MЧТ(n-1)} \leq u_{MЧТ(n-1),v,п}$.

Для этого берутся значения $u_{MЧТ(n-1)}$ от $u_{MЧТ(p)}$ до $u_{MЧТ(n-1),макс}$ (или до $u_{MЧТ(n-1),ч}$) с некоторым шагом и для них выполняется расчет тягового КПД трактора по [5–7].

Определяются теплотери при работе трактора во всем диапазоне регулирования ТАД от $f_{1,мин}$ до $f_{1,макс}$ для выбранного значения $u_{MЧТ(n-1)}$. Если пиковое значение потерь $\Delta P_{A'B,пик.г}$ при работе в диапазоне от $f_{1,мин}$ до $f_{1,н}$ при обеспечении M_φ на колесах не превышает пиковое значение потерь $\Delta P_{н,пик.г}$ при работе ТАД в диапазоне от $f_{1,н}$ до $f_{1,макс}$ (на диапазоне от $f_{1,н}$ до $f_{1,макс}$ должно выполняться условие $s \leq s_n$), то ТАД гарантированно обеспечит тепловой режим во всем своем рабочем диапазоне от $f_{1,мин}$ до $f_{1,макс}$ при выбранном $u_{MЧТ(n-1)}$. В ином случае есть варианты:

- увеличить $u_{MЧТ(n-1)}$;
- рассчитать систему охлаждения ТАД исходя из обеспечения отвода потерь $\Delta P_{A'B,пик.г}$;
- задать предполагаемый цикл работы ТАД, определить среднюю мощность потерь ТАД ΔP_c и в случае $\Delta P_c \leq \Delta P_{н,пик.г}$ тепловой режим будет выполняться, если же нет, то выбрать один из предыдущих вариантов.

Для $u_{MЧТ} = 64,85 \Delta P_{A'B,пик.г}$ несколько превышает $\Delta P_{н,пик.г}$ при $\varphi_{сц} = 0,8$ и массе трактора 11 500 кг; для $u_{MЧТ} = 71,33$ и более $\Delta P_{A'B,пик.г}$ не превышает $\Delta P_{н,пик.г}$ (см. рисунок 5, таблицу).

Для рассматриваемого трактора 5-го класса $u_{MЧТ,макс} = 103$, $u_{MЧТ(n-1),v}$ составит 102,07 для пахоты и 71,33 для сева, $u_{MЧТ(n-1),ч} = 82,0$ при $u_{MЧТ,n} = 33,25$, $u_{MЧТ(n-1),ч} = 87,7$ при $u_{MЧТ,n} = 35,57$, $u_{MЧТ(p)} = 62,74$ при $v_d = 7$ км/ч и $\delta_{доп} = 16\%$.

Для обеспечения работы на пахоте трактора на $n-1$ -й передаче $u_{MЧТ(n-1)}$ должно находиться в пределах от 62,74 до 102,07 (либо до 82,0–87,7, если использовать только участок работы ТАД от $f_{1,н}$ до $f_{1,макс}$ для n -й передачи). При этом если $u_{MЧТ(n-1)}$ будет находиться в пределах от 62,74 до 71,33, то сможет быть обеспечена работа трактора на севе полностью на $n-1$ -й передаче, не переключаясь на n -ю передачу. Расчет тягового КПД η_T показывает, при каком из значений $u_{MЧТ(n-1)}$ он больше. Графики $\eta_T(F_{кр})$ для значений $u_{MЧТ} = 64,85$ и 71,83 приведены в [7].

Таблица — Величина потерь $\Delta P_{н,пик.г}$ и $\Delta P_{A'B,пик.г}$ для различных значений $u_{MЧТ(n-1)}$ при массе трактора 11 500 кг и $\varphi_{сц} = 0,8$, работа без компенсатора реактивной мощности [7]
Table — Amount of losses $\Delta P_{н,пик.г}$ and $\Delta P_{A'B,пик.г}$ for different values of $u_{MЧТ(n-1)}$ with a tractor weight of 11,500 kg and $\varphi_{сц} = 0,8$, operation without a reactive power compensator [7]

$u_{MЧТ(n-1)}$	$v_T(f_{1,макс})$, км/ч	$v_T(f_{1,н})$, км/ч	$\Delta P_{н,пик.г}$, кВт	$\Delta P_{A'B,пик.г}$, кВт
35,57	36,10	14,64	10,3	78,3
62,74	20,46	8,33	10,3	11,7
64,85	19,80	8,04	10,3	11,2
71,33	18,00	7,31	10,3	10,1
71,83	17,88	7,26	10,3	10,0
87,70	14,64	5,94	10,3	6,7
102,07	12,58	5,12	10,3	4,8
103,00	12,46	5,07	10,3	4,8

Список литературы

1. Жданович, Ч.И. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. — 2016. — Т. 15, № 1. — С. 29–36. — DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-29-36>.
2. Жданович, Ч.И. Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. — 2017. — Т. 16, № 1. — С. 73–82. — DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82>.
3. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск: Беларуская навука, 2019. — 207 с.
4. Тяговый электропривод и электроотбор мощности как этап развития теории и конструкции сельскохозяйственного трактора / П.А. Амельченко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2014. — № 3. — С. 88–94.
5. Жданович, Ч.И. Реализация тяговых возможностей трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 1(54). — С. 5–14. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-5-14>.
6. Жданович, Ч.И. Тяговый КПД трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2020. — Вып. 9. — С. 131–135.
7. Жданович, Ч.И. Влияние реактивной мощности на тяговый КПД трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2021. — Вып. 10. — С. 45–49.
8. Жданович, Ч.И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. — 2015. — № 3. — С. 60–64.
9. Жданович, Ч.И. Определение максимального момента на колесах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — С. 54–59.
10. Жданович, Ч.И. Зависимость характеристик трактора с электромеханической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — С. 60–67.
11. Кацман, М.М. Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений / М.М. Кацман. — 3-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2001. — 463 с.
12. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. — 4-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
13. Тракторы. Теория: учеб. для студ. вузов по спец. «Автомобили и тракторы» / В.В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В.В. Гуськова. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.
14. Об использовании сельскохозяйственных тракторов на работах различного вида / И.Я. Дьяков [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1979. — № 7. — С. 7–9.
15. Плуг ППО-9-45К [Электронный ресурс] // ОАО «Минийтовский ремонтный завод». — Режим доступа: <http://mrz.by/catalog/products-catalog/zashita-reссора/plug-ppo-8-40k.html>. — Дата доступа: 20.05.2022.
16. Плуг ПН-8-35У [Электронный ресурс] // ОАО «Минский тракторный завод». — Режим доступа: http://www.belarus-tractor.com/catalog/mounted_plows_ploughing_corrall/plow-pn-8-35u/. — Дата доступа: 30.05.2022.
17. Плуг оборотный ПО-8 [Электронный ресурс] // Производственное общество с ограниченной ответственностью «Техмаш». — Режим доступа: <http://www.tehmarsh.by/productions/doc/289>. — Дата доступа: 30.05.2022.
18. Плуг ППО-8РК [Электронный ресурс] // ОАО «Минский завод шестерен». — Режим доступа: <https://mgw.by/products/plows/negotiable/with-pneumo-protection/plug-ppo8-pk/>. — Дата доступа: 10.06.2022.
19. Агрегат почвообрабатывающий посевной многофункциональный АППМ-6 [Электронный ресурс] // Минийтовский ремонтный завод. — Режим доступа: <http://www.mrz.by/state/AA.navID.130/AC.-1.180003630601/>. — Дата доступа: 22.04.2022.
20. Культиватор паровой КП - 9 [Электронный ресурс] // Минийтовский ремонтный завод. — Режим доступа: <http://www.mrz.by/state/AA.navID.131/AC.-1.180003630783/>. — Дата доступа: 22.04.2022.
21. Холодов, А.М. Землеройно-транспортные машины / А.М. Холодов, В.В. Ничке, Л.В. Назаров. — Харьков: Вища шк., 1982. — 192 с.
22. Трактор BELARUS-3022 ДЦ1 [Электронный ресурс] // ОАО «Минский тракторный завод». — Режим доступа: http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-3022dv/belarus-3022dc_1/. — Дата доступа 30.05.2022.
23. Трактор BELARUS-3522 [Электронный ресурс] // ОАО «Минский тракторный завод». — Режим доступа: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-3522/belarus-3522c/>. — Дата доступа: 30.05.2022.
24. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. — Взамен ГОСТ МЭК 60034-1-2007; введ. 01.05.2017. — Минск, Госстандарт — 58 с.
25. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: ГОСТ 2582-2013 — Взамен ГОСТ 2582-81; введ. 01.02.2016. — Минск, Госстандарт — 52 с.
26. Бекишев, Р.Ф. Общий курс электропривода: учебное пособие / Р.Ф. Бекишев, Ю.Н. Деметьев. — Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. — 302 с.
27. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев — М.: «Энергоатомиздат», 2001. — 704 с.

ZHDANOVICH Cheslav I., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department “Tractors”¹

E-mail: chzhdanovich@mail.ru

KALININ Nikita V.

Senior Researcher of the R&D Center “Agricultural Engineering”²

E-mail: knv9041986@rambler.ru

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 July 2022.

SELECTION OF THE RANGE OF GEAR RATIOS OF THE MECHANICAL PART OF THE ELECTROMECHANICAL POWER TRAIN OF THE TRACTOR

A method has been developed for selecting the gear ratio of the mechanical part of the power train (MPPT) to work on agricultural operations of a tractor of the 5th drawbar class equipped with an electromechanical power train with a traction induction electric motor (TIM). It is assumed that there are two gears: the high one (n -th) for operation in transport mode and the low one ($n-1$ st) for operation in operational and technological modes. The gear ratio MPPT $u_{MЧТ,n}$, corresponding to the n th gear, is determined from the condition of ensuring the required maximum velocity of the tractor. The gear ratio of the MPPT $u_{MЧТ(n-1)}$, corresponding to the $n-1$ st gear, must be in the range from the $u_{MЧТ(n-1),p}$, at which the minimum plowing velocity will be provided at the nominal value of the voltage frequency supplied to the TIM, to the $u_{MЧТ(n-1),max}$, determined by from the condition of providing the maximum possible velocity range of the tractor with only the n -th gear without overlapping its $n-1$ st gear. A formula is also proposed for determining the value of the $u_{MЧТ(n-1),v}$, at which the tractor can operate with the maximum velocity permissible for a given agricultural operation. If $u_{MЧТ(n-1),v} < u_{MЧТ(n-1)} < u_{MЧТ(n-1),p}$, then the entire velocity range for a given agricultural operation will be provided when working in the $n-1$ st gear. In order to determine the $u_{MЧТ(n-1)}$ with the best traction efficiency, it is proposed to carry out tractor traction calculation for the values of $u_{MЧТ(n-1)}$ taken in the range from $u_{MЧТ(n-1),p}$ to $u_{MЧТ(n-1),max}$ with a certain step. After that, for the selected value $u_{MЧТ(n-1)}$, it is necessary to calculate the TIM losses during tractor operation in the entire velocity range provided by the $n-1$ st gear. If the thermal mode of the TIM is not performed when the tractor is moving at low velocities in the $n-1$ st gear, then it is necessary either to take a larger value of the $u_{MЧТ(n-1)}$ at which it is performed, or in case of a small excess of the permissible power losses of the TIM, do not increase the $u_{MЧТ(n-1)}$, but take this into account when designing the TIM cooling system.

Keywords: tractor, traction induction electric motor, gear ratio, mechanical part of the power train, electromechanical power train, drawbar pull, slipping, theoretical velocity, actual velocity, traction efficiency

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-52-60>

References

- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Opredelenie peredatochnykh otnosheniy mekhanicheskoy chasti elektromekhanicheskoy transmissii traktora [Determination of transmission gear ratio in mechanical part of tractor electro-mechanical transmission]. *Science & technique*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-29-36> (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Analiz effektivnosti ispolzovaniya nakopiteley energii na traktore s elektromekhanicheskoy transmissiyey [Efficiency analysis of energy accumulating mechanism for tractor with electromechanical transmission]. *Science & technique*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82> (in Russ.).
- Poddubko S.N., et al. *Traktory XXI veka: sostoyanie i perspektivy* [Tractors of the 21st century: state and prospects]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2019. 207 p. (in Russ.).
- Amelchenko P.A., Zhukovskiy I.N., Pugachev A.P., Kaminskiy P.F., Stasilevich A.G., Klyuchnikov A.V. Tyagovyy elektropriwod i elektrootbor moshchnosti kak etap razvitiya teorii i konstruksii selskokhozyaystvennogo traktora [Traction electric drive and electric power take-off as a stage in the development of the theory and design of an agricultural tractor]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2014, iss. 3, pp. 88–94 (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Realizatsiya tyagovykh vozmozhnostey traktora s elektromekhanicheskoy transmissiyey [Realization of traction capabilities of a tractor with an electromechanical power train]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 1(54), pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-5-14> (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Tyagovyy KPD traktora s elektromekhanicheskoy transmissiyey [Traction efficiency of a tractor with an electromechanical power train]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2020, iss. 9, pp. 131–135 (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Vliyanie reaktivnoy moshchnosti na tyagovyy KPD traktora s elektromekhanicheskoy transmissiyey [Effect of reactive power on the tractor with an electromechanical power train]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2021, iss. 10, pp. 45–49 (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Vybora sposoba regulirovaniya tyagovogo asinkhronnogo elektrodvigatelya traktora i postroyeniya mekhanicheskoy kharakteristiki [Selection of method for regulation of tractor propulsion asynchronous electric motor and construction of mechanical characteristics]. *Science & technique*, 2015, no. 3, pp. 60–64 (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Opredelenie maksimalnogo momenta na kolesakh traktora s elektromekhanicheskoy transmissiyey [Determination of maximum moment on wheels of tractor with electromechanical transmission]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu kafedry "Traktory" BNTU "Problemy proektirovaniya i razvitiya traktorov, mobilnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta"* [Proc. International scientific and technical conference devoted to the 60th anniversary of "Tractors" Department of Belarussian National Technical University "Problems in designing and development of tractors, mobile machinery, urban electric transport"]. Minsk, 2013, pp. 54–59 (in Russ.).
- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Zavisimost kharakteristik traktora s elektromekhanicheskoy transmissiyey ot temperatury obmotok tyagovogo elektrodvigatelya [Dependence of characteristics of tractor with mechanical transmission on temperature of traction electric motor windings]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu kafedry "Traktory" BNTU "Problemy proektirovaniya i razvitiya traktorov, mobilnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta"* [Proc. International scientific and technical conference devoted to the 60th anniversary of "Tractors" Department of

- Belarussian National Technical University “Problems in designing and development of tractors, mobile machinery, urban electric transport”. Minsk, 2013, pp. 60–67 (in Russ.).
11. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electric machinery]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 463 p. (in Russ.).
 12. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (in Russ.).
 13. Guskov V.V., Belev N.N., Atamanov Yu.E., Bocharov N.F., Ksenevich I.P., Solonskiy A.S. *Traktory. Teoriya* [Tractors. Theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p. (in Russ.).
 14. Dyakov I.Ya., Prikhodko L.S., Shilyaev V.A., Zabaluev M.G., Kozlov V.F. Ob ispolzovanii selskokhozyaystvennykh traktorov na rabotakh razlichnogo vida [On the use of agricultural tractors in various types of work]. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*, 1979, no. 7, pp. 7–9 (in Russ.).
 15. *Plug PPO-9-45K* [Plough PPO-9-45K]. Available at: <http://mrz.by/catalog/products-catalog/zashita-ressora/plugin-ppo-8-40k.html> (accessed 20 May 2022) (in Russ.).
 16. *Plug PN-8-35U* [Plough PN-8-35U]. Available at: http://www.belarus-tractor.com/catalog/mounted_plows_ploughing_corral/plow-pn-8-35u/ (accessed 30 May 2022) (in Russ.).
 17. *Plug oborotnyy PO-8* [Reversible plough PO-8]. Available at: <http://www.tehmash.by/productions/doc/289> (accessed 30 May 2022) (in Russ.).
 18. *Plug PPO-8RK* [Plough PPO-8RK]. Available at: <https://mgw.by/products/plows/negotiable/with-pneumo-protection/plugin-ppo8-pk/> (accessed 10 June 2022) (in Russ.).
 19. *Agregat pochvoobrabatyvayushchiy posevnoy mnogofunktsionalnyy APPM-6* [Multifunctional tillage sowing unit APPM-6]. 2013. Available at: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.130/AC:-1.180003630601/> (accessed 22 April 2022) (in Russ.).
 20. *Kultivator parovoy KP-9* [Steam cultivator KP-9]. Available at: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.131/AC:-1.180003630783/> (accessed 22 April 2022) (in Russ.).
 21. Kholodov A.M., Nichke V.V., Nazarov L.V. *Zemleroyno-transportnye mashiny* [Earthmoving and transport vehicles]. Kharkiv, Vysshaya shkola Publ., 1982. 192 p. (in Russ.).
 22. *Traktor BELARUS-3022.DTs1* [Tractor BELARUS-3022.DTs1]. Available at: http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-3022dv/belarus-3022dc_1/ (accessed 30 May 2022) (in Russ.).
 23. *Traktor BELARUS-3522* [Tractor BELARUS-3522]. Available at: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-3522/belarus-3522c/> (accessed 30 May 2022) (in Russ.).
 24. State Standard IEC 60034-1-2014. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Chast 1. Nominalnye znacheniya parametrov i ekspluatatsionnye kharakteristiki* [Rotating electrical machines. Part 1. Rating and performance]. Minsk, Gosstandart Publ., 2017. 58 p. (in Russ.).
 25. State Standard 2582-2013. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 52 p. (in Russ.).
 26. Bekishev R.F., Dementev Yu.N. *Obshchiy kurs elektroprivoda* [General course on electric drive]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2010. 302 p. (in Russ.).
 27. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 704 p. (in Russ.).