

УДК 629.3.014

Ч.И. ЖДАНОВИЧ, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Н.В. КАЛИНИН

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ТЯГОВЫЙ КПД ТРАКТОРА С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Приведена методика определения тягового КПД трактора с электромеханической трансмиссией и выполнено сравнение графиков тягового КПД при различных значениях передаточного отношения механической части трансмиссии. Предложенная методика дает возможность задавать и аналитически определять значения всех параметров составляющих привода, влияющих на тяговый КПД трактора.

Ключевые слова: буксование, момент, сила тяги на крюке, скольжение, тяговый КПД, частота напряжения

Введение. Тяговый КПД является важным параметром, позволяющим оценивать эффективность работы трактора. По методике [1, 2] определения параметров, необходимых для построения тяговой характеристики трактора с асинхронными тяговыми электрическими машинами [3], в качестве рабочего участка принят участок характеристики тягового асинхронного двигателя (ТАД) при оборотах не ниже номинальных и с регулированием, обеспечивающим постоянство мощности, причем по формуле [1, (4)] расчета силы тяги на крюке мощность на валу ТАД на всем рабочем участке равна своему номинальному значению, развивается при оптимальной мощности ДВС согласно [2, с. 41] и связана с ней формулой [2, с. 41, (1)] через КПД генератора и ТАД. Однако КПД ТАД и генератора учитывают не все потери (в частности, не учитывают потери на реактивную мощность).

Цель исследований — разработать методику, позволяющую более точно выполнить теоретическое сравнение тягового КПД трактора при различных передаточных отношениях трансмиссии. Также предлагается использовать в качестве рабочего и участок характеристики электродвигателя при оборотах ниже номинальных с целью уменьшения числа передач трактора. Главным отличием разрабатываемой методики является теоретический расчет параметров тягового электродвигателя в каждой точке построения тяговых характеристик с возможностью задавать законы регулирования электродвигателя, математическая модель которого прописана аналитически; КПД электромеханической трансмиссии не принимается постоянным, его значение определяется в каждой точке расчета с использованием известных для электрических машин зависимостей; характеристика электродвигателя корректируется с учетом ограничений исходя из свойств опорной поверхности и возможном ограничении передаваемой ему мощности.

Выполнение тягового расчета. Для проведения тягового расчета нужно задать:

- кривую буксования, представляющую собой зависимость значений силы тяги на крюке $F_{кр}$ от буксования δ (таблицей или формулой) и максимальное допустимое значение буксования $\delta_{доп}$ для данного режима работы трактора;
- максимальную мощность ДВС $P_{емax}$, передаваемую генератору;

- параметры схемы замещения генератора и скольжение генератора s_r , а также механический КПД генератора $\eta_{мех}$, если он учитывается [4], КПД преобразователя частоты $\eta_{п}$, параметры схемы замещения ТАД, номинальное напряжение ТАД $U_{1,н}$, номинальную частоту $f_{1,н}$ питающего напряжения, номинальное скольжение ТАД s_n [5, 6] или параметры для его определения, кривую зависимости магнитного потока от тока [7, с. 62, рисунок 3.1], рабочий диапазон частот f_1 напряжения для выбранной передачи, алгоритм регулирования ТАД [6];

- передаточное отношение механической части трансмиссии (МЧТ) $u_{тр}$ от вала ТАД до ведущих колес, коэффициент сопротивления качению f_c , массу трактора, динамический радиус колеса r_d , некоторые составляющие тягового КПД.

Расчет выполняется индивидуально для каждой передачи. После окончания расчета можно сопоставить вместе результаты для всех передач и построить по ним графики. Ниже приведена методика расчета.

1. Рассчитываются в программе некоторые параметры электродвигателя согласно [5, 6], в т. ч. номинальное скольжение s_n , если оно не задано.

2. Определяется значение силы тяги на крюке $F_{кр,доп}$ при заданном допустимом буксовании $\delta_{доп}$ по кривой буксования (интерполяцией или аналитически), сила сопротивления качению F_f , максимально допустимый момент на колесах по сцеплению M_ϕ при заданном $\delta_{доп}$.

3. Определяется максимально возможные мощности: входная на валу генератора $P_{2Г,маx}$ (по схеме на рисунке 1 принимается $P_{2Г,маx} = P_{емax} \eta_{сз}$ или $P_{2Г,маx} \approx P_{емax}$) и выходная $P_{1Г,маx}$ генератора по формуле, полученной из [4, (6)].

Тогда максимальная мощность P_{ice} , которую может потребить ТАД (рисунок 1):

$$P_{ice} = P_{1Г,маx} / \eta_{п}$$

Предлагается два случая расчета.

Первый случай — ограничение по полной мощности. Потребляемая ТАД полная мощность $S_{1,маx}$ не может превысить мощность P_{ice} .

Второй случай — ограничение по активной мощности. Принимается максимально возможную активную потребляемую мощность $P_{1,маx}$ ТАД равной P_{ice} и считаем, что всю требуемую реактивную мощность обеспечивает компенсатор реактивной мощности.

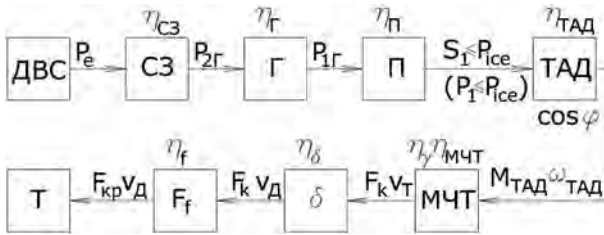


Рисунок 1 — Передача мощности от ДВС на тягу (Т) трактора с электромеханической трансмиссией: P_e — мощность ДВС; $P_{Г}$ и $P_{ТАД}$ — входная и выходная мощности генератора; $S_{1,i}$, P_1 — потребляемые полная и активная мощности ТАД; F_k , $F_{кр}$, F_f — касательная сила тяги, сила тяги на крюке, сила сопротивления качению; $M_{ТАД}$, $\omega_{ТАД}$ — момент и угловая скорость на выходном валу ТАД; v_T и v_d — теоретическая и действительная скорость трактора; $\eta_{ТАД}$, $\eta_{П}$, $\eta_{Г}$, $\eta_{СЗ}$, $\eta_{МЧТ}$ — КПД ТАД, преобразователя частоты, генератора, соединительного звена (муфты или согласующего редуктора) и механической части трансмиссии; η_{γ} — КПД, учитывающий потери мощности на образование колеи и деформацию грунта; η_{ν} — КПД, учитывающий трение в шинах; η_{δ} — КПД, учитывающий потери скорости движения; P_{ice} — максимальная мощность, которая может быть передана ТАД; Г — генератор; СЗ — звено, соединяющее ДВС и генератор (муфта или редуктор); П — преобразователь частоты; МЧТ — механическая часть трансмиссии

Расчет будем выполнять по ограничению по полной мощности (первый случай).

4. Выполняется расчет для каждого значения частоты $f_{1,i}$ питающего напряжения ТАД из интервала частот от максимальной $f_{1,max}$ до минимальной $f_{1,min}$. При использовании вычислительной техники удобно организовать цикл по f_i от $f_{1,max}$ до $f_{1,min}$ с заданным шагом расчета частоты Δf (берем $\Delta f = 1$ Гц).

4.1. Определяется критическое скольжение $s_{кр(f,i)}$ при частоте $f_{1,i}$ [6]. Поскольку ТАД может не развить критическое скольжение $s_{кр(f,i)}$ и даже номинальное s_n из-за ограничений по P_{ice} и M_{ϕ} , определяем допустимые значения скольжения $s_{lim,i} \leq s_n$ для номинального и $s_{кр,lim,i} \leq s_{кр(f,i)}$ для предельного режимов работы ТАД с учетом ограничений по P_{ice} и M_{ϕ} (см. [8] и [9]).

Далее расчет ведется при скольжении, равном $s_{lim,i}$ для номинального и $s_{кр,lim,i}$ для предельного режима работы ТАД с учетом ограничений по P_{ice} и M_{ϕ} . Если для частоты $f_{1,i}$ значения $s_{lim,i}$ и $s_{кр,lim,i}$ совпадают (ТАД не может развить скольжение $s > s_n$), то точки характеристик для номинального и предельного режима при заданной частоте $f_{1,i}$ также будут совпадать.

4.2. Вращающий момент ТАД $M_{ТАД,i}$ по рекомендации [7, с. 29] принимается равным электромагнитному моменту ТАД и рассчитывается по формуле [6, (3); 8, (8)].

4.3. Определяются для трактора: момент на колесах $M_{k,i}$ [5, (9)], теоретическая скорость $v_{T,i}$ [5, (7)], касательная сила тяги $F_{k,i}$ [10, с. 57] и сила тяги на крюке $F_{кр,i}$ из формул [10, с. 57] и [10, с. 175]:

$$F_{кр,i} = M_{k,i} \cdot r_d - F_f.$$

4.4. Определяется по формуле или интерполяцией по таблице значений $\delta(F_{кр})$ коэффициент буксования δ_i для полученных значений силы тяги на крюке $F_{кр,i}$.

4.5. Действительная скорость движения трактора $v_{д,i}$ определяется согласно [5, (8)].

4.6. Определяются: потребляемая полная $S_{1,i}$ [7, с. 13], активная $P_{1,i}$ [11, с. 191, (14.43)] мощности ТАД и выходная мощность на валу ТАД $P_{ТАД,i}$ согласно

[7, 8, 11] (расчет механических потерь для применяемого ТАД — согласно [12]).

При ограничении по полной мощности для определения требуемой выходной мощности генератора $P_{Г,i}$ на $\eta_{ПЧ}$ делится полная мощность $S_{1,i}$, а если — по активной, то $P_{1,i}$ (см. рисунок 1).

4.7. Входная мощность генератора $P_{2Г,i}$ рассчитывается по формуле [4, (6)].

При расчете без учета $\eta_{СЗ}$ принимаем мощность ДВС $P_{e,i} = P_{2Г,i}$.

4.8. Рассчитываем тяговый КПД трактора.

Тяговый КПД трактора согласно [10, с. 148, (4,4)] состоит из нескольких составляющих. Одна из составляющих КПД трактора — КПД трансмиссии. Согласно [10, с. 150], КПД электромеханической трансмиссии трактора: $\eta_{ТГ} = \eta_{\nu} \eta_{\gamma}$, где η_{ν} — КПД, учитывающий электрические потери, η_{γ} — КПД, учитывающий механические потери в трансмиссии.

Представим КПД электромеханической трансмиссии $\eta_{ТГ}$ в несколько ином виде. КПД $\eta_{ТГ}$ должен учитывать: КПД механической части трансмиссии $\eta_{МЧТ}$ от электродвигателя к ведущим колесам, КПД электродвигателя $\eta_{ТАД}$, КПД генератора $\eta_{Г}$, КПД преобразователя частоты $\eta_{П}$ и то, что без использования компенсаторов реактивной мощности часть мощности, передаваемой от генератора ТАД, пойдет на реактивную мощность. Также может учитываться КПД $\eta_{СЗ}$ муфты, соединяющей генератор и ДВС (или КПД согласующего редуктора, если он применен).

Чтобы учесть КПД генератора, КПД электродвигателя, КПД преобразователя частоты и коэффициент мощности, достаточно разделить выходную мощность электродвигателя $P_{ТАД}$, передаваемую далее в механическую часть трансмиссии, на входную мощность генератора $P_{2Г}$, которая поступает от ДВС. Тогда КПД трансмиссии:

$$\eta_{ТГ} = \frac{P_{ТАД}}{P_{2Г}} \cdot \eta_{МЧТ} \cdot \eta_{СЗ}.$$

В состав тягового КПД трактора также входит КПД η_{ν} , учитывающий трение в шинах [10, с. 146, (4,4)].

Согласно [10, с. 147, рисунок 4.5], механический КПД трансмиссии (в данном случае ему будет соответствовать $\eta_{МЧТ}$) зависит от загрузки ДВС. По графику, приведенному на [10, с. 147, рисунок 4.5], механический КПД трансмиссии при моменте от 0,5 номинального и выше будет не ниже 90 %. Согласно [10, с.176], произведение механического КПД (которому в данном случае соответствует $\eta_{МЧТ}$) и η_{ν} для тягового расчета принимается постоянным, т. е. $\eta_{МЧТ} \eta_{\nu} = \text{const}$. Обозначим $\eta_{\Sigma} = \eta_{МЧТ} \eta_{\nu}$.

КПД, учитывающий потери мощности на образование колеи и деформацию грунта [10, с. 159, (4,5)]:

$$\eta_f = 1 - \frac{F_f}{F_k}.$$

Учитывая, что $F_{кр} = F_k - F_f$ [10, с. 175]:

$$\eta_f = \frac{F_{кр}}{F_k}.$$

Тяговый КПД с учетом обозначения η_{Σ} :

$$\eta_{Т,i} = \eta_{СЗ} \frac{P_{ТАД,i}}{P_{2Г,i}} \eta_{\Sigma} \frac{F_{кр,i}}{F_{k,i}} (1 - \delta_i).$$

Результаты расчета. С некоторым приближением возьмем кривую буксования из [13, с. 61] для трактора 5-го класса массой 11,5 кг и запишем в виде таблицы значений $F_{кр}$ и δ , $\delta_{доп}$ берем 16 %.

Возьмем $P_{емax} = 190$ кВт, т. е. несколько меньше максимальной 220 кВт [14, с. 82].

Алгоритм регулирования и параметры ТАД зададим согласно [6], $f_{i,n} = 73$ Гц, $f_{i,min} = 10$ Гц, $f_{i,max} = 180$ Гц, $f_{i,lim} = 59$ Гц (см. $f_{i,lim}$ в [6]), ТАД и тяговый асинхронный генератор берем аналогично [3].

Согласно [14], для трактора 5-го класса аналогично «БЕЛАРУС-3023» применяются передаточные отношения трансмиссии 33,2521, 64,8471, 71,8344, 140,106. Расчеты показывают, что при отношении 33,2521 трактор не разовьет достаточный момент при номинальном режиме работы ТАД, а при максимальном режиме будут очень большие потери мощности в ТАД, перегрев ТАД и низкий КПД (аналогично [15] с передаточным отношением 29). Расчет проведем для передаточных отношений МЧТ 64,85, 71,83, 140, а также для передаточного отношения МЧТ 103, подобранного по методике [16].

КПД $\eta_{мчт}$ согласно [14, с. 87] равен 0,8897 для «БЕЛАРУС-3023». Возьмем на одно зацепление меньше (по методике [16] и расчетам [15] достаточно 2 передач вместо 4, т. е. одну ступень из трансмиссии [14, с. 83] можно убрать); тогда $\eta_{мчт} = 0,924-0,927$ и с учетом η_i ориентировочно примем $\eta_{\Sigma} = 0,92$.

Примем $f_c = 0,1$ как для стерни [10, с. 150, табл. 4.4]. Массу трактора берем 12,5 т [14, с.82], r_d зададим около 0,956 м, условно приведем всю массу трактора к задним колесам и приняв коэффициент динамического несоответствия передних и задних колес [10, с. 91] равным нулю.

Расчет выполним средствами Delphi XE. Цикл для расчета параметров был организован по f_i , однако алгоритм (методика) построения графиков [17] позволяет выбрать любые два параметра по горизонтальным осям (верхней и нижней) и любые два — по вертикальным (левой и правой).

Зависимость буксования от силы тяги на крюке показана на рисунке 2 с ограничением по допустимому буксованию (16 %); она соответствует кривой буксования и одинакова для всех случаев расчета.

Представим зависимость тягового КПД и скорости от силы тяги на крюке на рисунке 3 для номинального режима и на рисунке 4 — для предельного режима; для наглядности — только для одного значения $u_{тр}$ (71,83 — для номинального и 64,85 — для предельного), форма графика для остальных выбранных $u_{тр}$ аналогична, будет только различаться протяженность участков графика.

На участке CD и $C'D'$ скорость уменьшается с увеличением силы тяги на крюке, а значит, и момента на



Рисунок 2 — Кривая буксования

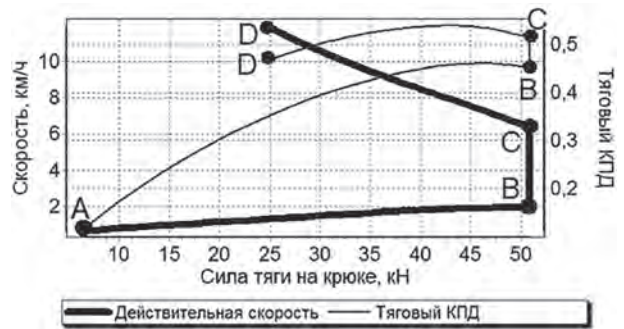


Рисунок 3 — График скорости и тягового КПД трактора для $u_{тр} = 71,83$ при номинальном режиме работы ТАД с учетом ограничения момента ТАД по M_{ϕ} при $\delta_{доп}$ (участок CB), P_{ice} (участок CD) и s_n (участок AB)

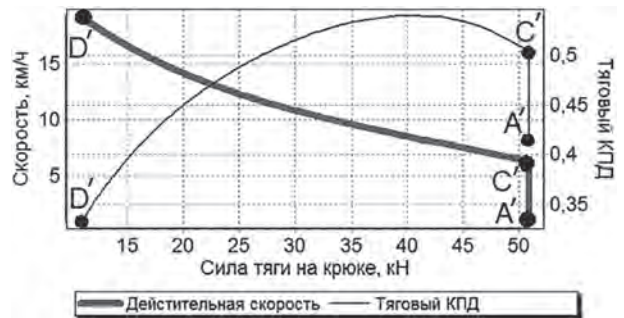


Рисунок 4 — График скорости и тягового КПД трактора для $u_{тр} = 64,85$ при предельном режиме работы ТАД с учетом ограничения момента ТАД по M_{ϕ} при $\delta_{доп}$ (участок $A'C'$) и P_{ice} (участок $C'D'$)

колесах, т. е. будет обеспечиваться устойчивое движение [18, с. 43–44].

Участки CD для номинального и $C'D'$ для предельного режимов при заданном значении $P_{емax}$ совпадают: тяга ограничена мощностью применяемого ДВС (мощность ДВС на участках CD и $C'D'$ равна $P_{емax}$, рисунок 5) и по расчету $s_{кр,lim} = s_{lim} < s_n$, т. е. ТАД не развивает даже номинальный режим работы. При несколько большем значении $P_{емax}$ (не 190 кВт, а порядка 220 кВт) для номинального режима на участке CD будет выдерживаться $s_{lim} = s_n$ при мощности ДВС меньше $P_{емax}$ (рисунок 6), а для предельного на участке $C'D'$ — $s_n < s_{кр,lim} < s_{кр(f)}$ при мощности ДВС, равной $P_{емax}$.

Согласно расчетам, $s_{кр,lim} < s_{кр(f)}$ во всем диапазоне работы трактора при всех рассматриваемых значениях $u_{тр}$, т. е. для предельного режима работы ограничения по моменту ТАД нет. На участке $A'C'$ расчет проводился с ограничением по допустимому буксованию $\delta_{доп}$ (рисунок 3); чтобы было выдержано ограничение по $\delta_{доп}$ (см. рисунок 3), мощность ДВС на участке $A'C'$ должна быть не выше значений, представленных на графике рисунка 5.

Для номинального режима на участке BC $s_{lim} < s_n$ и сила тяги на крюке ограничена $\delta_{доп}$. На участке AB ограничена моментом ТАД при s_n . Для поддержания номинального режима работы ТАД на участке AB с $s_{lim} = s_n$ нужно каким-то образом обеспечивать регулирование в неустойчивом режиме работы [18, с. 43–44], т. е. увеличивать обороты ТАД при возрастании сопротивления со стороны дороги или на крюке. Если обеспечить поддержание s_n на участке AB возможно, то при одинаковых значениях силы тяги на крюке на участке AB скорость и тяговый КПД будут меньшими, чем на участке CD (см. рисунок 3).

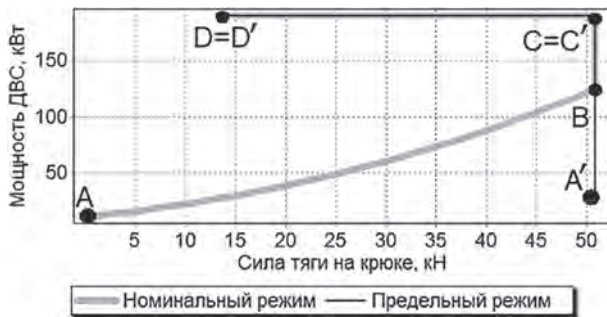


Рисунок 5 — График потребляемой мощности ДВС трактора для $u_{TP} = 64,85$ с учетом ограничений M_p по $\delta_{доп}$ (участки BC и A'C') для номинального и предельного режимов и по s_n (участок AB) для номинального режима, не превышающей P_{max}



Рисунок 6 — График потребляемой мощности ДВС трактора для $u_{TP} = 64,85$ с учетом ограничений M_p по $\delta_{доп}$ (участки BC и A'C') для номинального и предельного режимов и по s_n (участки AB и CD) для номинального режима при значении $P_{max} = 220$ кВт

Предельно допустимое буксование на участке CD достигается только в точке C, которой по расчетам соответствует скорость 6,2–6,4 км/ч (в зависимости от u_{TP}). Учитывая, что плуги [19] позволяют работать со скоростями порядка 7–9 км/ч, т. е. в пределах участка CD, а также то, что на участке CD движение трактора происходит в устойчивом режиме и буксование не может превысить предельно допустимое, проведем сравнение тягового КПД трактора на передачах именно на участке CD (рисунок 7). Согласно графикам, при силе тяги от 45,3 кН до максимальной тяговой КПД выше при $u_{TP} = 103$, от 35 до 45,3 кН — при $u_{TP} = 71,83$, а ниже 45,3 кН — при $u_{TP} = 64,85$.

Поскольку на участке CD мощность ДВС постоянна и равна P_{max} , то и расходы топлива ДВС (удельный и часовой) тоже будут постоянны и соответствовать P_{max} и влияние изменения $\eta_{MЧТ}$ от нагрузки при расчете на участке CD не вносит дополнительную погрешность (согласно расчетам, выходная мощность ТАД на участке CD изменяется лишь в некоторых небольших пределах).

При полной или частичной компенсации потребляемой ТАД реактивной мощности графики будут отличаться от приведенных на рисунке 7.

Заключение. Разработана методика расчета тягового КПД трактора с электромеханической трансмиссией при максимально возможной силе тяге на крюке, определяемой исходя из ограничения по допустимому буксованию, максимальной мощности ДВС, отдаваемой генератору, и по максимально возможному моменту ТАД, а также для случая, когда момент ТАД при этом дополнительно ограничен номинальным скольжением ТАД. Было проведено сравнение значений тя-

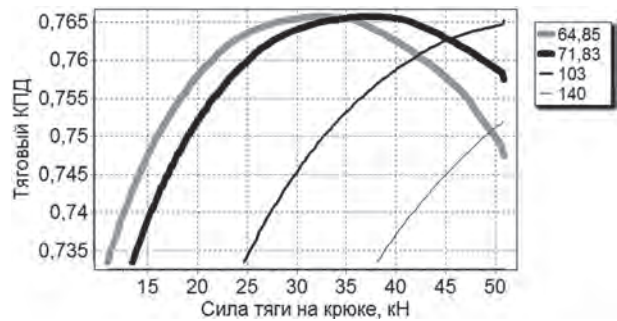


Рисунок 7 — Сравнение значений тягового КПД при передаточных отношениях МЧТ 64,85, 71,83, 103, 140

говых КПД для различных передаточных отношений механической части трансмиссии на участке тяговой характеристики, для которого потребляемая мощность ДВС постоянна и равна максимальной, буксование не превышает предельно допустимые значения, а трактор работает в устойчивом режиме работы, когда с уменьшением его скорости увеличивается момент на колесах.

Список литературы

1. Тяговый электропривод и электрооборудование мощности как этап развития теории и конструкции сельскохозяйственного трактора / П.А. Амельченко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2014. — № 3. — С. 88–94
2. Методика расчета теоретической тяговой характеристики колесного трактора с электромеханической трансмиссией / Гуськов В.В. [и др.] // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию каф. «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / БНТУ; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — С. 40–46.
3. Электродвигатель асинхронный ТАД2М280-310 и электродвигатель асинхронный ТАД2М280-310 : ТУ 16-12 ВАКИ. 526622. — Введ. впервые. — ОАО «НИПИЭМ», 2012. — 29 с.
4. Жданович, Ч.И. Выбор мощности генератора электромеханической трансмиссии / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Автомобиле- и тракторостроение: материалы междунар. науч.-техн. конф. / БНТУ; редкол.: отв. ред. Д.В. Капский [и др.]. — 2018. — Т. 1. — С. 53–57.
5. 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., посвященной 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / БНТУ; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — С. 54–59.
6. 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.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
8. 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., посвященной 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / БНТУ; редкол.: В.П. Бойков, Ч.И. Жданович. — Минск, 2013. — С. 60–67.
9. Калинин, Н.В. Определение ограничения потребляемой мощности тягового электродвигателя исходя из макси-

- мальной мощности применяемого ДВС / Н.В. Калинин // Наука — образованию, производству, экономике: материалы 16-й междунар. науч.-техн. конф. — 2018. — Т. 2. — С. 9.
10. 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.
 11. Кацман, М.М. Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений / М.М. Кацман. — 3-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2000. — 463 с.
 12. Калинин, Н.В. Механические потери в тяговом асинхронном электродвигателе трактора / Н.В. Калинин // Наука — образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. — 2014. — Т. 2. — С. 10.
 13. Построение теоретической тяговой характеристики трактора: учеб. пособие по дипломному проектированию для студ. спец. 0513 «Автомобили и тракторы» / А.Ф. Андреев, В.В. Гуськов, В.И. Кабанов. — Минск: БПИ, 1975 — 93 с.
 14. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, Беларусь. наука, 2019. — 207 с.
 15. Жданович, Ч.И. Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. — 2017. — № 1. — С. 73–82.
 16. Жданович, Ч.И. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Наука и техника. — 2016. — № 1. — С. 29–36.
 17. Жданович, Ч.И. Универсальный график для отображения характеристик трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Научные решения проблем развития тракторной техники, многоцелевых колесных и гусеничных машин, городского электротранспорта: сб. науч. тр. междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 65-летию каф. «Тракторы», 20–21 янв. 2019 / редкол.: В. П. Бойков (отв. ред.) [и др.]. — Минск: БНТУ, 2019. — С. 14–22.
 18. Руктешель, О.С. Выбор параметров и оценка тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля: учеб.-методич. пособие / О.С. Руктешель. — Минск: БНТУ, 2015. — 79 с.
 19. Плаг ППО-9-45К [Электронный ресурс] // ОАО «Минский ремонтный завод». — Режим доступа: <http://mrz.by/catalog/products-catalog/zashita-reссора/plug-ppo-8-40k.html>. — Дата доступа: 10.07.2020.

Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V.

Traction efficiency of a tractor with an electromechanical power train

A method for determining the traction efficiency of a tractor with an electromechanical power train is presented and a comparison of the traction efficiency graphs for different values of the gear ratio of the mechanical part of the power train is made. The proposed technique makes it possible to set and analytically determine the values of all parameters of the drive components that affect the traction efficiency of the tractor.

Поступила в редакцию 21.07.2020.