



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

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 Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.01.2021.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАКТОРА С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Разработана методика для оценки тяговых возможностей трактора с электромеханической трансмиссией и определения действительной скорости его движения с учетом трех ограничений: по допустимому буксованию трактора, предельной мощности применяемого двигателя внутреннего сгорания и допустимому режиму работы тягового асинхронного электродвигателя (ТАД). Разработанная математическая модель позволяет определить силу тяги на крюке и действительную скорость движения трактора при регулировании ТАД во всем рабочем диапазоне частот подаваемого на ТАД напряжения для сравнительной оценки тяговых возможностей трактора при использовании разных передаточных отношений механической части трансмиссии (МЧТ), а также определить скольжение и другие параметры ТАД при его работе в составе электромеханической трансмиссии трактора. Расчеты показывают, что: 1) при слишком большом передаточном отношении МЧТ не будет обеспечен весь диапазон рабочих скоростей трактора на пахоте, а при слишком малом передаточном отношении МЧТ трактор не сможет развить предельно возможную, исходя из допустимого буксования, силу тяги на крюке ни при какой частоте напряжения из диапазона регулирования ТАД без превышения номинального режима работы ТАД; 2) чем больше передаточное отношение ТАД — тем больше будет участок диапазона частотного регулирования ТАД, на котором он не сможет развить даже номинальное скольжение из-за ограничения по допустимому буксованию трактора, а для одних и тех же частот на этом участке скольжение ТАД будет больше ограничено при большем передаточном отношении МЧТ; чем меньше передаточное отношение МЧТ — тем больше будет превышено номинальное скольжение ТАД при разгоне трактора с поддержанием максимально возможной, исходя из допустимого буксования, силы тяги от минимальной скорости до скоростей, соответствующих пахоте.

Ключевые слова: трактор, электромеханическая трансмиссия, сила тяги на крюке, скольжение, допустимое буксование, мощность двигателя, действительная скорость, ток, частота напряжения

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-5-14>

Введение. Для оценки тяговых и экономических качеств трактора строят его тяговую характеристику. В [1] построена характеристика $M_k(v_T)$

трактора с электромеханической трансмиссией (M_k — момент на колесах трактора, v_T — теоретическая скорость движения трактора) с учетом

скольжения ТАД при максимальном значении коэффициента сцепления $\varphi_{\text{сц}}$ и с использованием передаточных отношений трансмиссии, подобранных по методике [2]. Были рассмотрены два случая: когда есть накопители энергии (ограничения по мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) нет) и когда нет накопителей энергии (потребляемая мощность ТАД ограничена максимальной мощностью ДВС). Однако в вышеперечисленных методиках не учитывается буксование трактора. В методиках [3, 4] не раскрываются особенности работы генератора и ТАД, в частности, скольжение ТАД.

Целью данной работы является разработка методики и оценка реализации тяговых возможностей трактора с электромеханической трансмиссией с учетом трех ограничений: по сцеплению с учетом допустимого буксования $\delta_{\text{доп}}$; по мощности ДВС, которую он может передавать в трансмиссию; по моменту ТАД при его номинальном и критическом скольжении ТАД.

Методика расчета. 1. Определяется максимальная мощность P_{ice} , которая может быть передана ТАД исходя из максимально возможной мощности ДВС P_{emax} , передаваемой генератору.

Руководствуясь схемой потока мощности для трактора с механической трансмиссией [5], составим схему потока мощности. Мощность ДВС P_e поступает на генератор, соединенный с ДВС муфтой или согласующим редуктором с КПД $\eta_{\text{сз}}$.

Мощность на валу генератора $P_{2Г}$ с учетом $\eta_{\text{сз}}$ (рисунок 1):

$$P_{2Г} = P_e \eta_{\text{сз}}. \quad (1)$$

Согласно [6], генератор является не источником, а потребителем реактивной мощности, поэтому на схеме (см. рисунок 1) покажем на выходе из генератора активную мощность $P_{1Г}$ и добавим источник реактивной мощности $Q_{\text{ВГ}}$ (например, конденсаторы [6]) для его самовозбуждения. Если бы использовался генератор другого типа, который был бы и источником реактивной мощности тоже, то на выходе из него на схеме можно было бы показать полную мощность.

Согласно [7] мощность на роторе генератора $P'_{2Г}$ с выходной мощностью генератора $P_{1Г}$ связана формулой [7], а мощность на роторе генератора $P'_{2Г}$ будет меньше мощности на валу генератора $P_{2Г}$ на величину механических и добавочных потерь, которыми можно пренебречь как несущественными, приняв $P'_{2Г} \approx P_{2Г}$. Тогда из [7] выразим $P_{1Г}$ через $P_{2Г}$:

$$P_{1Г} = P_{2Г} \frac{s_{Г} r_1 + c_{1Г} r_2'}{r_2' (1 - s_{Г})}, \quad (2)$$

где $r_1, r_2', c_{1Г}$ — параметры схемы замещения генератора [7]; $s_{Г}$ — скольжение генератора.

Если взять максимальное значение P_{emax} мощности P_e , передаваемой генератору, то найденные значения $P_{2Г}$ по (1) и $P_{1Г}$ по (2) будут соответство-

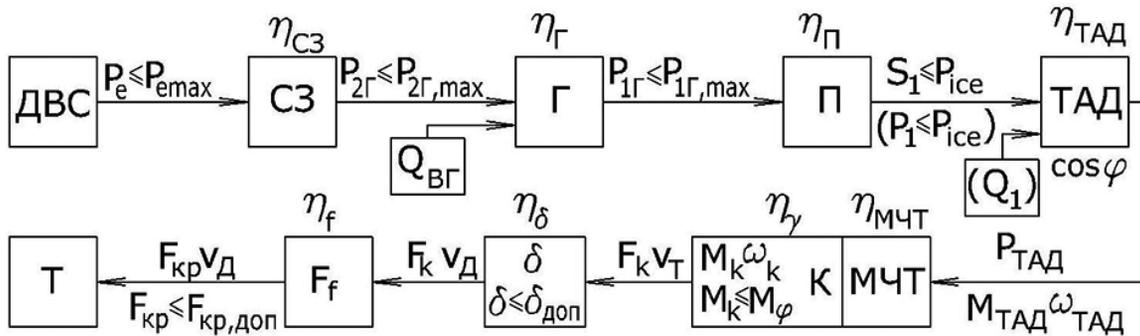


Рисунок 1 — Передача мощности в тракторе с электромеханической трансмиссией с тяговыми асинхронными генератором и двигателем от ДВС на тягу (Т): P_e — мощность ДВС; $P_{2Г}$ и $P_{1Г}$ — входная и выходная мощности генератора; S_1, P_1 — потребляемые полная и активная мощности ТАД; $F_k, F_{\text{кр}}, F_f$ — касательная сила тяги, сила тяги на крюке, сила сопротивления качению;

$M_{\text{ТАД}}, \omega_{\text{ТАД}}$ — момент и угловая скорость на выходном валу ТАД; M_k, ω_k — момент на колесах и угловая скорость колеса трактора; $v_{\text{т}}$ и $v_{\text{д}}$ — теоретическая и действительная скорость трактора; $\eta_{\text{ТАД}}, \eta_{П}, \eta_{Г}, \eta_{\text{сз}}, \eta_{\text{МЧТ}}$ — КПД ТАД, преобразователя частоты, генератора, соединительного звена (муфты или согласующего редуктора) и механической части трансмиссии; η_{δ} — КПД, учитывающий потери скорости движения [5]; $\eta_{\text{т}}$ — КПД, учитывающий потери мощности на образование колеи и деформацию грунта [5];

$\eta_{\text{к}}$ — КПД, учитывающий трение в шинах [5]; P_{ice} — максимальная мощность, которая может быть передана ТАД при $P_e = P_{\text{emax}}$; P_{emax} — максимально возможная мощность ДВС, передаваемая генератору; $P_{2Г, \text{max}}$ и $P_{1Г, \text{max}}$ — мощность на входе и выходе генератора при $P_e = P_{\text{emax}}$; Г — генератор; СЗ — звено, соединяющее ДВС и генератор (муфта или редуктор); П — преобразователь частоты;

МЧТ — механическая часть трансмиссии; К — колесный движитель; $Q_{\text{ВГ}}$ — источник реактивной мощности для генератора;

Q_1 — дополнительный источник реактивной мощности для ТАД (может отсутствовать)

Figure 1 — Power transmission in a tractor with an electromechanical power train with a traction induction generator and motor from an ICE to traction (T): P_e — ICE power; $P_{2Г}$ and $P_{1Г}$ — input and output power of the generator; S_1, P_1 — apparent and active TIM power consumption; $F_k, F_{\text{кр}}, F_f$ — tangential traction force, drawbar pull, rolling resistance force; $M_{\text{ТАД}}, \omega_{\text{ТАД}}$ — torque and angular velocity on TIM output shaft; M_k, ω_k — wheel torque and angular velocity of the tractor wheel; $v_{\text{т}}$ and $v_{\text{д}}$ — theoretical and actual speed of the tractor; $\eta_{\text{ТАД}}, \eta_{П}, \eta_{Г}, \eta_{\text{сз}}, \eta_{\text{МЧТ}}$ — efficiency of the TIM, frequency converter, generator, connecting link (coupling or matching gearbox) and the mechanical part of the power train; η_{δ} — efficiency that takes into account the loss of speed [5]; $\eta_{\text{т}}$ — efficiency, taking into account the power loss on the formation of a track and the deformation of the ground [5]; $\eta_{\text{к}}$ — efficiency that takes into account the friction in the tires [5]; P_{ice} — maximum power that can be transmitted to the TIM at $P_e = P_{\text{emax}}$; P_{emax} — maximum possible internal combustion engine power transmitted to the generator; $P_{2Г, \text{max}}$ and $P_{1Г, \text{max}}$ — generator input and output power at $P_e = P_{\text{emax}}$; Г — generator; СЗ — the link connecting the ICE and the generator (coupling or gearbox); П — frequency converter; МЧТ — mechanical part of the power train; К — wheel propulsion; $Q_{\text{ВГ}}$ — reactive power source for the generator; Q_1 — additional reactive power source for TIM (may not be available)

вать максимально возможным мощностям $P_{2Г, \max}$ на входе и $P_{1Г, \max}$ на выходе генератора. Тогда максимальная мощность P_{ice} , которая может быть передана ТАД от генератора с учетом КПД преобразователя частоты $\eta_{П}$:

$$P_{ice} = P_{1Г, \max} \eta_{П}$$

Если потребляемая реактивная мощность ТАД ничем не компенсируется, то максимальная потребляемая полная мощность ТАД $S_{1, \max}$ равна P_{ice} (представляем P_{ice} как полную мощность с $\cos\varphi = 1$). Если компенсируется вся реактивная мощность, потребляемая ТАД, то максимальная потребляемая ТАД активная мощность $P_{1, \max}$ равна P_{ice} (представляем P_{ice} как активную мощность) — для этого случая обозначим на схеме источник (компенсатор) реактивной мощности Q_1 (см. рисунок 1).

2. *Определяется момент на колесах M_ϕ при $\delta_{\text{доп}}$.*

Значение силы тяги на крюке $F_{\text{кр, доп}}$ при заданном допустимом буксовании $\delta_{\text{доп}}$ определяется по кривой буксования (интерполяцией или аналитически).

Сила сопротивления качению F_f определяется согласно [5] как $F_f = f_c G$, где f_c — коэффициент сопротивления качению; G — вес трактора.

При расчете по [5] момента на колесах трактора M_k , исходя из момента ДВС, учитывается КПД трансмиссии без КПД двигателя η_ν , поэтому на структурной схеме (см. рисунок 1) M_k в таком случае нужно было бы обозначать как момент, подводимый к колесу со стороны ДВС через трансмиссию без учета свойств шины. Произведение $F_k v_t$ на структурной схеме [5] записано уже как мощность на шине с учетом КПД шины η_ν . Однако согласно [5], $F_k v_t = M_k \omega_k$, а не $F_k v_t = M_k \omega_k \eta_\nu$ (ω_k — угловая скорость вращения колеса вокруг оси), а в работах [3, 4] η_ν в формулах нет вообще, т. е. η_ν может не учитываться. Согласно [5], при тяговом расчете рассматривается произведение КПД трансмиссии и η_ν как одно целое. Поступим таким образом: M_k будем определять как момент непосредственно на колесе с учетом η_ν (см. рисунок 1), а не как момент, подводимый к колесу со стороны трансмиссии.

Согласно [5], сила тяги $F_k = M_k / r_d$ (r_d — динамический радиус колеса), откуда момент на колесах $M_k = F_k \cdot r_d$. Подставим сюда формулу $F_k = F_{\text{кр}} + F_f$ [5] и выразим M_k при известной силе тяги на крюке $F_{\text{кр}}$:

$$M_k = (F_{\text{кр}} + F_f) / r_d. \quad (3)$$

M_ϕ при $\delta_{\text{доп}}$ — это момент M_k , соответствующий $F_{\text{кр, доп}}$:

$$M_\phi = (F_{\text{кр, доп}} + F_f) / r_d.$$

При $F_{\text{кр}} \leq F_{\text{кр, доп}}$ будет $M_k \leq M_\phi$ и $\delta \leq \delta_{\text{доп}}$. При $M_k > M_\phi$ будет превышено $\delta_{\text{доп}}$.

Далее расчеты будут разными для каждого передаточного отношения МЧТ $u_{\text{МЧТ}}$.

3. *Определение $M_{\text{ТАД, сц}}$ — момента ТАД при M_ϕ для заданного $\delta_{\text{доп}}$.* $M_{\text{ТАД, сц}}$ для заданного значения

$u_{\text{МЧТ}}$ определим по формуле [8] с учетом η_ν согласно рисунку 1:

$$M_{\text{ТАД, сц}} = \frac{M_\phi}{u_{\text{МЧТ}} \eta_{\text{МЧТ}} \eta_\nu}.$$

4. *Далее результаты расчета будут зависеть от значения текущей частоты $f_{1,i}$ напряжения.* Берем диапазон ТАД частот напряжения, подаваемого на ТАД, от максимальной $f_{1, \max}$ до минимальной $f_{1, \min}$. Из данного диапазона либо выбираем отдельные частоты $f_{1,i}$, либо берем $f_{1,i}$ с определенным шагом изменения частоты Δf (например, 1 Гц). Интервал частот f_1 может быть поделен на участки с различными законами совместного регулирования частоты и напряжения [9].

Определяется коэффициент k_{f_i} как отношение $f_{1,i}$ к $f_{1, \text{н}}$ [9] и затем k_{U_i} по значению k_{f_i} в зависимости от принятого закона регулирования для участка интервала частот, к которому относится k_{f_i} . Коэффициент k_{U_i} показывает отношение напряжения $U_{1,i}$ при частоте $f_{1,i}$ к $U_{1, \text{н}}$ при $f_{1, \text{н}}$.

Определение скольжения ТАД. От скольжения s_i ТАД зависят и частота вращения ротора ТАД [10], и момент ТАД [11], а также потери мощности в роторе ТАД [10]. Номинальным режимом работы будем называть режим, при котором скольжение ТАД s ограничено своим номинальным значением s_n и равно ему при отсутствии ограничений по M_ϕ при $\delta_{\text{доп}}$ и P_{ice} , а предельным — режим, при котором оно ограничено критическим скольжением $s_{\text{кр}(f_i)}$ и равно ему при отсутствии ограничений по M_ϕ при $\delta_{\text{доп}}$ и P_{ice} . Номинальное скольжение s_n определяется при номинальном напряжении $U_{1, \text{н}}$ и номинальной частоте напряжения $f_{1, \text{н}}$ (например, согласно [10], если не задано); $s_{\text{кр}(f_i)}$ определяется для каждой частоты $f_{1,i}$ напряжения по формуле [9].

Скольжение ТАД при номинальном и предельном режиме для частоты $f_{1,i}$ с учетом ограничений по P_{ice} назовем $s_{\text{lim}(P), i}$ и $s_{\text{кр, lim}(P), i}$ ($s_{\text{lim}(P), i} \leq s_n$; $s_{\text{кр, lim}(P), i} \leq s_{\text{кр}(f_i)}$), скольжение ТАД с учетом ограничения по P_{ice} и по M_ϕ при $\delta_{\text{доп}}$ — $s_{\text{lim}, i}$ для номинального ($s_{\text{lim}, i} \leq s_n$) и $s_{\text{кр, lim}, i}$ для предельного ($s_{\text{кр, lim}, i} \leq s_{\text{кр}(f_i)}$) режима работы ТАД.

Определение $s_{\text{lim}(P), i}$ и $s_{\text{кр, lim}(P), i}$. При ограничении по полной мощности ($S_{1, \max} = P_{ice}$) для k_{U_i} и k_{f_i} рассчитывается максимально возможный ток $I_{ar, \text{lim}, i}$ по [12] и ток статора по [13]: $I_{ar, i}$ — для номинального режима с подстановкой s_n и $I_{ar, \text{нр}, i}$ — для предельного режима с подстановкой $s_{\text{кр}(f_i)}$ в формулы [13].

Сравнивается полный ток статора при максимальном $I_{ar, \text{нр}, i}$ и при номинальном $I_{ar, i}$ режиме с допустимым током по мощности ДВС $I_{ar, \text{lim}, i}$.

Если $I_{ar, \text{lim}, i}$ больше и $I_{ar, \text{нр}, i}$ и $I_{ar, i}$, то ограничение по мощности ДВС нет, на данном этапе расчета принимаем $s_{\text{lim}(P), i} = s_n$ и $s_{\text{кр, lim}(P), i} = s_{\text{кр}(f_i)}$.

Если $I_{ar, \text{lim}, i}$ меньше хотя бы одного из них, то это значит, что как минимум на предельный режим работы ТАД будет ограничен возможностями ДВС. В таком случае рассчитывается значение

максимально возможного для $I_{ar1,lim,i}$ при $k_{U,i}$ и $k_{f,i}$ скольжения (обозначим его $s_{lim(l),i}$) по [12], а значение $s_{кр,lim(P),i}$ присваивается равным $s_{lim(l),i}$.

Теперь осталось определить, будет ли ограничен номинальный режим работы по P_{ice} . Для этого сравнивается значение скольжения $s_{lim(l),i}$ с номинальным s_n . Если $s_n < s_{lim(l),i}$ либо они равны, то для номинального режима ограничения по P_{ice} нет и принимаем на данном этапе расчета $s_{lim(P),i} = s_n$. Если же $s_n > s_{lim(l),i}$, то это значит, что и номинальное скольжение ТАД не удастся развить; в таком случае параметры номинального режима будут равны параметрам предельного режима, рассчитанного для $s_{lim(l),i}$, и $s_{lim(P),i} = s_{кр,lim(P),i} = s_{lim(l),i}$.

Сразу (без расчета $I_{lar,i}$ и $I_{lar,пр,i}$) определить $s_{lim(l),i}$ по [12] и затем сравнить с s_n и $s_{кр(f),i}$ не получится: формула [12] не работает при подстановке тока $I_{ar1,lim,i}$ превышающего рассчитанный для $s_{кр(f),i}$ полный ток статора. Аналогичная ситуация с моментом $M_{ТАД,сн}$ и скольжением $s_{lim,i}$ для формулы (5).

При ограничении по активной мощности ($P_{1,max} = P_{ice}$) отличие в том, что рассчитывается максимально возможный ток $I_{a1,lim,i}$ по [12] и сравнивается с определенным по [13] активным (а не полным) током статора, а скольжение $s_{lim(l),i}$ считается по [12] для случая $P_{1,max} = P_{ice}$, а не $S_{1,max} = P_{ice}$.

Определение $s_{lim,i}$ и $s_{кр,lim,i}$. Согласно [11], вращающий момент $M_{ТАД}$ на валу ТАД по рекомендации [14] принимаем равным электромагнитному моменту ТАД и рассчитываем по формуле [11] (она же [9]). Для расчета $M_{ТАД,i}$ на номинальном режиме подставим в формулу [11] $s = s_{lim(P),i}$, $k_f = k_{f,i}$ и $k_U = k_{U,i}$ и число фаз $m_1 = 3$ (используем трехфазный ТАД):

$$M_{ТАД,i} = \left(3 \cdot U_{1,н}^2 \cdot k_{U,i}^2 \cdot r_2' \cdot p_1 \right) / \left(2 \cdot \pi \cdot f_{1,н} \cdot k_{f,i} \cdot s_{lim(P),i} \times \left[r_1 + \frac{c_1 \cdot r_2'}{s_{lim(P),i}} \right]^2 + k_{f,i}^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 \right), \quad (4)$$

где r_1 , r_2' , x_1 , x_2' — параметры схемы замещения ТАД; p_1 — число пар полюсов ТАД [9]; c_1 определяется согласно [9].

Здесь и далее момент ТАД можно определять более точно, не принимая его равным электромагнитному моменту ТАД; для этого нужно рассчитать мощность на выходе ТАД $P_{ТАД,i}$. Согласно энергетической диаграмме [14], $P_{ТАД,i}$ получим после вычитания из электромагнитной мощности $P_{ЭМ,i}$, рассчитываемой по [11], потерь в роторе, определяемых по [11], и механических потерь, определяемых по [15]. По [8] определяются обороты ТАД на выходе $n_{ТАД,i}$, затем их нужно преобразовать в угловую скорость $\omega_{ТАД,i}$ и получить $M_{ТАД,i}$, разделив $P_{ТАД,i}$ на $\omega_{ТАД,i}$. Однако будем использовать формулу (4) для расчета $M_{ТАД,i}$ поскольку момент механических потерь, которым пренебрегаем, весьма мал согласно [14].

Сравним значение $M_{ТАД,i}$ с моментом $M_{ТАД,сн}$, допустимым, исходя из заданного ограничения по буксованию. Еще раз обращаем внимание, что при расчете $M_{ТАД,i}$ возможное ограничение по P_{ice} уже учтено: расчет велся по скольжению $s_{lim(P),i}$.

Если $M_{ТАД,i} \leq M_{ТАД,сн}$, то ограничения момента $M_{ТАД,i}$ по $\varphi_{сн}$, исходя из $\delta_{доп}$, нет и принимаем $s_{lim,i} = s_{lim(P),i}$. Будет либо $s_{lim,i} = s_{lim(P),i} = s_n$, когда ТАД может развить s_n , либо $s_{lim,i} = s_{lim(P),i} < s_n$, когда ТАД не может развить s_n , исходя из ограничения по P_{ice} .

Если $M_{ТАД,i} > M_{ТАД,сн}$, то будет ограничение $\varphi_{сн}$ исходя из $\delta_{доп}$. Принимаем $M_{ТАД,i} = M_{ТАД,сн}$ и определяем $s_{lim,i}$ по формуле (5) [11]:

$$s_{lim,i} = \frac{m_1 \cdot U_{1,н}^2 \cdot k_{U,i}^2 \cdot r_2' \cdot p_1}{2 \cdot M_{ТАД,сн} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{1,н} \cdot k_{f,i}} - c_1 \cdot r_2' \cdot r_1 - \frac{\sqrt{\left(c_1 \cdot r_2' \cdot r_1 - \frac{m_1 \cdot U_{1,н}^2 \cdot k_{U,i}^2 \cdot r_2' \cdot p_1}{2 \cdot M_{ТАД,сн} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{1,н} \cdot k_{f,i}} \right)^2 - \left(k_{f,i}^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 + r_1^2 \right) \cdot c_1^2 \cdot r_2'^2}}{k_{f,i}^2 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 + r_1^2}. \quad (5)$$

Определим, будет ли ограничен предельный режим работы ТАД по $\varphi_{сн}$ при $\delta_{доп}$.

Если $s_{lim,i} < s_n$, то ТАД не может развить даже s_n . В этом случае $s_{кр,lim,i}$ принимаем равным $s_{lim,i}$ и расчеты для номинального и предельного режимов при $f_1 = f_{1,i}$ совпадут.

Если условие $s_{lim,i} < s_n$ не выполняется, то ТАД может развить скольжение, равное s_n в данной точке характеристики. В таком случае нужно определить, как будет ограничен предельный режим работы.

Подставим в формулу (4) $s_{кр,lim(P),i}$ вместо $s_{lim(P),i}$ и получим в результате вместо $M_{ТАД,i}$ момент на предельном режиме $M_{ТАД,пр,i}$ с учетом возможного ограничения по P_{ice} .

Если $M_{ТАД,пр,i} \leq M_{ТАД,сн}$, то ограничения по $\varphi_{сн}$, исходя из $\delta_{доп}$, нет; принимаем $s_{кр,lim,i} = s_{кр,lim(P),i}$. Если при этом $s_{кр,lim(P),i} = s_{кр(f),i}$, то ТАД может развить максимально возможный момент при данной частоте питающего напряжения, а если $s_{кр,lim(P),i} < s_{кр(f),i}$, то момент ТАД ограничен по P_{ice} .

Если $M_{ТАД,пр,i} > M_{ТАД,сн}$, то момент будет ограничен по $\varphi_{сн}$ ($\delta_{доп}$). По формуле (5) вместо $s_{lim,i}$ рассчитаем $s_{кр,lim,i}$.

На данный момент *определены значения скольжения ТАД с учетом возможных ограничений по мощности ДВС и по сцеплению*: $s_{lim,i}$ — для номинального режима, $s_{кр,lim,i}$ — для предельного режима. Далее будем рассчитывать значения необходимых параметров именно при таких значениях скольжения. Если для частоты $f_{1,i}$ значения $s_{lim,i}$ и $s_{кр,lim,i}$ совпадают, то точки характеристик для номинального и предельного режима при заданной частоте $f_{1,i}$ также будут совпадать.

Токи статора определяются по формулам [13] с подстановкой $s_{lim,i}$ для номинального режима и $s_{кр,lim,i}$ — для предельного.

Момент ТАД определяется по формуле (4). Для расчета момента ТАД $M_{ТАД,i}$ на номинальном режиме в формулу (4) вместо $S_{lim(P),i}$ подставляется $s_{lim,i}$, а для расчета момента ТАД $M_{ТАД,пр,i}$ на предельном режиме — $s_{кр,lim,i}$.

Момент на колесах $M_{k,i}$ для номинального режима определяется по формуле (6) ([8] с учетом η_γ), а для определения момента на колесах $M_{к,пр,i}$ для предельного режима в (6) вместо $M_{ТАД,i}$ подставляется $M_{ТАД,пр,i}$:

$$M_{k,i} = M_{ТАД,i} u_{МЧТ} \eta_{МЧТ} \eta_\gamma. \quad (6)$$

Определяются для номинального режима: теоретическая скорость $v_{T,i}$ [8], касательная сила тяги $F_{k,i}$ [5], сила тяги на крюке $F_{кр,i}$ (из (3) получим формулу для $F_{кр,i}$):

$$v_{T,i} = \frac{7,2 \cdot \pi \cdot f_{1,n} \cdot k_{f,i} \cdot r_d}{u_{МЧТ} \cdot P_1} (1 - s_{lim,i});$$

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

Для определения теоретической скорости $v_{T,пр,i}$ касательной силы тяги $F_{к,пр,i}$, силы тяги на крюке $F_{кр,пр,i}$ при предельном режиме в те же формулы вместо $s_{lim,i}$ и $M_{k,i}$ подставляется $s_{кр,lim,i}$ и $M_{к,пр,i}$.

Определяется по формуле или интерполяцией по таблице значений $\delta(F_{кр})$ коэффициент буксования для полученных значений силы тяги на крюке в номинальном δ_i для $F_{кр,i}$ и предельном $\delta_{пр,i}$ для $F_{кр,пр,i}$ режимах.

Если сила тяги на крюке равна силе тяге на крюке при предельно допустимом буксовании $F_{кр,доп}$, то можно сразу присвоить значение буксования заданному предельно допустимому $\delta_{доп}$.

Действительная скорость движения трактора [8] $v_{Д,i}$ для номинального и $v_{Д,пр,i}$ для предельного режимов:

$$v_{Д,i} = v_{T,i} (1 - \delta_i); \quad v_{Д,пр,i} = v_{T,пр,i} (1 - \delta_{пр,i}).$$

Если точки построения характеристик на номинальном и предельном режимах не совпадают, ($s_{кр,lim,i} > s_{lim,i}$), то $v_{Д,пр,i}$ немного меньше $v_{Д,i}$ и $v_{T,пр,i}$ немного меньше $v_{T,i}$.

Активная потребляемая мощность ТАД $P_{1,i}$ (Вт) [10], полная мощность $S_{1,i}$ [14] с учетом $U_{1,i} = U_{н,i} \cdot k_{U,i}$ (В·А) при $s = s_{lim,i}$:

$$P_{1,i} = 3I_{1a,i} U_{1,i} k_{U,i}; \quad S_{1,i} = 3I_{1ap,i} U_{1,i} k_{U,i}.$$

Для определения активной $P_{1,пр,i}$ и полной $S_{1,пр,i}$ мощностей при $s = s_{кр,lim,i}$ в формулы вместо $I_{1a,i}$, $I_{1ap,i}$, $P_{1,i}$, $S_{1,i}$ подставляются $I_{1a,пр,i}$, $I_{1ap,пр,i}$, $P_{1,пр,i}$, $S_{1,пр,i}$ ($I_{1a,i}$ и $I_{1a,пр,i}$ — активный ток статора для номинального и предельного режимов).

Определяется значение потребляемой мощности генератора $P_{1Г,i}$ и ДВС $P_{e,i}$ в номинальном режиме. Или в режиме ниже номинального, если он невозможен.

Выходная мощность генератора при ограничении по полной мощности:

$$P_{1Г,i} = S_{1,i} / \eta_{П}. \quad (7)$$

Выходная мощность генератора при ограничении по активной мощности:

$$P_{1Г,i} = P_{1,i} / \eta_{П}. \quad (8)$$

Если $P_{1Г,i} = P_{1Г,макс}$ по (3), то работа ТАД на номинальном режиме ограничена по P_{ice} и генератор и ДВС работают на максимальной мощности. Принимается: $P_{1Г,i} = P_{1Г,макс}$; $P_{2Г,i} = P_{2Г,макс}$; $P_{e,i} = P_{e,макс}$.

Если же $P_{1Г,i} < P_{1Г,макс}$, то необходимо определить $P_{2Г,i}$ и $P_{e,i}$, $P_{2Г,i}$ по формуле [7] с подстановкой $P_{1Г,i}$ в качестве $P_{1Г}$. Согласно схеме на рисунке 1, $P_{e,i} = P_{2Г,i} / \eta_{СЗ}$, а без учета $\eta_{СЗ}$: $P_{e,i} = P_{2Г,i}$.

Определяется мощность генератора (выходная $P_{1Г,пр,i}$ и на валу $P_{2Г,пр,i}$) и ДВС $P_{e,пр,i}$ при предельном режиме работы.

Если $P_{1Г,i} = P_{1Г,макс}$ (ограничен по P_{ice} даже номинальный режим), то $P_{1Г,пр,i} = P_{1Г,i} = P_{1Г,макс}$; $P_{2Г,пр,i} = P_{2Г,i} = P_{2Г,макс}$; $P_{e,пр,i} = P_{e,i} = P_{e,макс}$.

Если $P_{1Г,i} < P_{1Г,макс}$, то при расчете по ограничению по полной мощности ТАД для определения $P_{1Г,пр,i}$ в (7) вместо $S_{1,i}$ подставляется $S_{1,пр,i}$, а при расчете по ограничению по активной мощности ТАД — $P_{1,пр,i}$ вместо $P_{1,i}$ в (8). Если $P_{1Г,пр,i} = P_{1Г,макс}$, то предельный режим ограничен по P_{ice} и принимается $P_{1Г,пр,i} = P_{1Г,макс}$; $P_{2Г,пр,i} = P_{2Г,макс}$; $P_{e,пр,i} = P_{e,макс}$.

Если $P_{1Г,пр,i} < P_{1Г,макс}$, тогда определяются $P_{2Г,пр,i}$, $P_{e,пр,i}$ с подстановкой $P_{1Г,пр,i}$, $P_{2Г,пр,i}$ вместо $P_{1Г,i}$, $P_{2Г,i}$.

Определение силы тяги на крюке трактора.

Кривую буксования исследуемого трактора построим, используя данные работы [16]. Установим ограничение по буксованию $\delta_{доп} = 16\%$. Условно приведем всю массу трактора к задним колесам, приняв коэффициент динамического несоответствия передних и задних колес [5] равным нулю. Задаем динамический радиус заднего колеса $r_d = 0,956$ м и $f_c = 0,1$ аналогично [17], массу трактора (12,5 т согласно [18]).

Генератор ТАД и их параметры берем аналогично [7, 9, 17–19]. КПД преобразователя частоты $\eta_{П} = 0,98$ аналогично [20]. Алгоритм регулирования ТАД зададим согласно [9] от $f_{1,мин} = 10$ Гц до $f_{1,макс} = 180$ Гц, $f_{1,лим} = 59$ Гц (см. $f_{1,лим}$ в [9]), $f_{1,n} = 73$ Гц. Параметры схемы замещения $r_1, r'_2, x_1, x'_2, x_0$ и номинальный ток холостого хода $I_{0,n}$ для генератора берем такими же, как и для ТАД, поскольку применяются в качестве генератора и ТАД одинаковые асинхронные машины. Кривую намагничивания берем с рисунка [14] и записываем в табличном виде. Согласно [18], мощность ДВС трактора — 220 кВт. Возьмем $P_{e,макс} = 190$ кВт.

Расчет выполним для передаточных чисел МЧТ 64,85, 71,83, 103 и 140 аналогично [17]. Также аналогично [17] примем $\eta_{МЧТ} \eta_\gamma = 0,92$.

Программа для расчета составлена в интегрированной среде Delphi XE с использованием кривых THorizLineSeries по рекомендациям [21]. Согласно алгоритму построения универсального

графика [22], можно использовать по 2 горизонтальные и вертикальные оси и выбирать по осям X и Y любые из рассчитанных величин, причем сделать это достаточно быстро. График на рисунке 8 построен в Excel. Все остальные графики построены в Delphi XE. На всех рисунках точки A, B, C, D относятся к графикам работы при номинальном режиме ($s_{lim} \leq s_n$), а A', B', C', D' — при предельном ($s_{кр,lim} \leq s_{кр(f)}$); точки с индексом «1» относятся к $u_{МЧТ} = 64,85$, «2» — к $u_{МЧТ} = 71,83$, «3» — к $u_{МЧТ} = 103$ и «4» — для $u_{МЧТ} = 140$.

Рассмотрим работу на номинальном режиме при $s = s_{lim}$, рассчитанном с учетом ограничений $S_1 \leq P_{ice}, M_k \leq M_\phi$ при $\delta_{доп}$ и $s \leq s_n$. График, показывающий, какая скорость v_d будет соответствовать f_1 при $s = s_{lim}$, представлен на рисунке 2, а график, показывающий силу тяги на крюке $F_{кр}$, которой будет соответствовать скорость v_d при $s = s_{lim}$, — на рисунке 3. На рисунке 4 для двух передач представлены графики, показывающие максимально возможную силу тяги на крюке $F_{кр}$ и буксование δ во всем диапазоне частотного регулирования ТАД (от $f_{1,min}$ до $f_{1,max}$) при $s = s_{lim}$, а на рисунке 5 — скольжение s_{lim} и мощность P_e . Согласно графикам, на участке $AB: s_{lim} = s_n, P_e < P_{emax}$ и $\delta < \delta_{доп}$, т. е. ограничение по скольжению ТАД ($s \leq s_n$). На участке $BC: \delta = \delta_{доп}, P_e < P_{emax}$ и $s_{lim} < s_n$, т. е. ограничение по M_ϕ при $\delta_{доп}$. На участке $CD: P_e = P_{emax}, s_{lim} < s_n$ и $\delta < \delta_{доп}$, т. е. ограничение по P_{ice} . Точке C соответствует одна и та же скорость v_d для всех передач, а с уменьшением $u_{МЧТ}$ протяженность участка CD и диапазон рабочих скоростей увеличивается (см. рисунок 3). При $u_{МЧТ} = 140$ максимальная скорость несколько ниже, чем агротехнически допустимая скорость плуга [23].

Посмотрим, чем отличается работа на предельном режиме при $s = s_{кр,lim}$, когда ограничения по P_{ice} и M_ϕ при $\delta_{доп}$ остаются, а скольжение ТАД ограничено не s_n , а $s_{кр(f)}$. На рисунке 6 покажем силу тяги на крюке $F_{кр,пр}$ и буксование $\delta_{пр}$ во всем диапазоне частотного регулирования ТАД для двух передач, а на рисунке 7 сравним мощность ДВС и скольжение ТАД при ограничении по s_n и $s_{кр(f)}$ на примере $u_{МЧТ} = 103$. Как видно по гра-

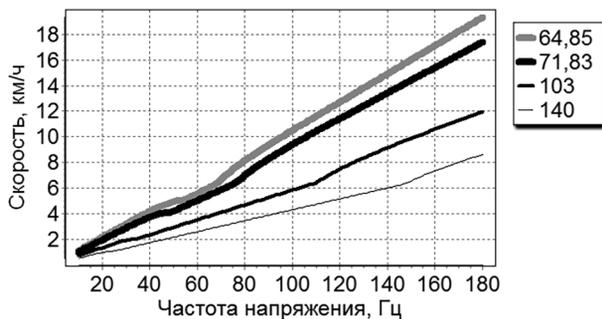


Рисунок 2 — Значения действительной скорости трактора v_d , соответствующие частоте напряжения f_1 при $s = s_{lim}$ для передаточных отношений МЧТ 64,85; 71,83; 103; 140
Figure 2 — Values of the actual speed of the tractor v_d corresponding to the voltage frequency f_1 at $s = s_{lim}$ for the gear ratios of the MPPT 64.85; 71.83; 103; 140

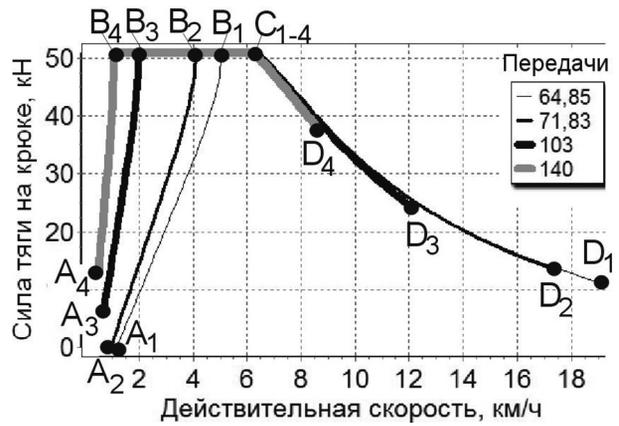


Рисунок 3 — Сила тяги на крюке $F_{кр}$, соответствующая действительной скорости движения трактора v_d при $s = s_{lim}$ для передаточных отношений МЧТ 64,85; 71,83; 103 и 140
Figure 3 — Drawbar pull $F_{кр}$ corresponding to the actual speed of the tractor v_d at the $s = s_{lim}$ for the gear ratios of the MPPT 64.85; 71.83; 103 and 140

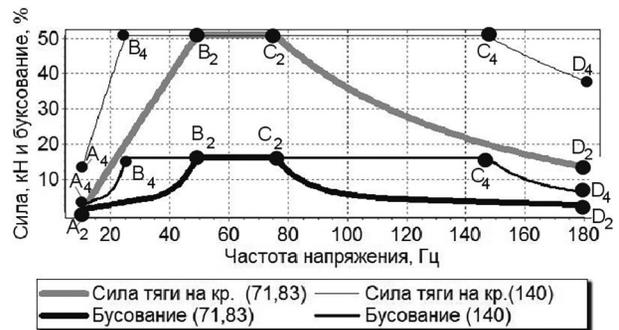


Рисунок 4 — Значения силы тяги на крюке $F_{кр}$ и буксования δ во всем диапазоне частот напряжения f_1 при $s = s_{lim}$ для $u_{МЧТ} = 71,83$ и $u_{МЧТ} = 140$
Figure 4 — Values of the drawbar pull $F_{кр}$ and the slip δ over the entire frequency range of the voltage f_1 at $s = s_{lim}$ for $u_{МЧТ} = 71.83$ and $u_{МЧТ} = 140$

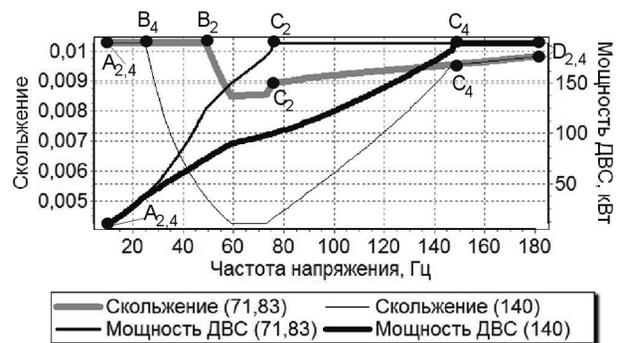


Рисунок 5 — Скольжение ТАД s_{lim} и развиваемая ДВС мощность P_e , соответствующая s_{lim} , при частоте напряжения f_1 для $u_{МЧТ} = 71,83$ и $u_{МЧТ} = 140$
Figure 5 — TIM slip s_{lim} and ICE power P_e corresponding to s_{lim} , at the voltage frequency f_1 for $u_{МЧТ} = 71.83$ and $u_{МЧТ} = 140$

фикам, при заданном значении P_{emax} участок $C'D'$ совпадает с CD , а также на нем ограничение по P_{ice} . Во всем диапазоне частот напряжения от $f_{1,min}$ и $f_{1,max}$ $s_{кр,lim}$ не достигает $s_{кр(f)}$ (на рисунке 8 приведены графики $s_{кр,lim}$ и $s_{кр(f)}$ для $u_{МЧТ} = 64,85$; для $u_{МЧТ}$, равных 103, 140 и 71,83, ситуация аналогичная). На участке $A'C'$ $\delta_{пр} = \delta_{доп}$ и $P_{e,пр} < P_{emax}$, т. е. ограничение по M_ϕ при $\delta_{доп}$. На участке BD для номинального

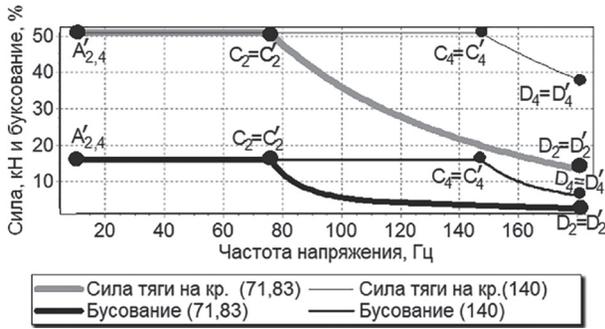


Рисунок 6 — Сила тяги на крюке $F_{кр,пр}$ и буксование $\delta_{пр}$ при частоте напряжения f_1 при $s = s_{кр,lim}$ для $u_{МЧТ} = 71,83$ и $u_{МЧТ} = 140$
 Figure 6 — Drawbar pull $F_{кр,пр}$ and the slip $\delta_{пр}$ at the voltage frequency f_1 at $s = s_{кр,lim}$ for $u_{МЧТ} = 71,83$ and $u_{МЧТ} = 140$

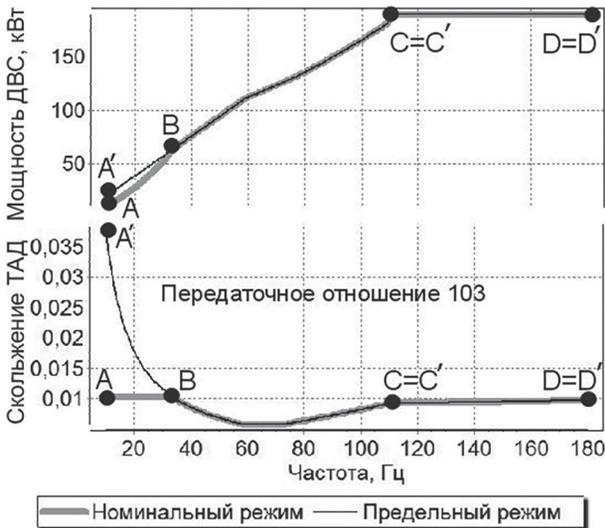


Рисунок 7 — Скольжение s_{lim} , $s_{кр,lim}$ ТАД и мощность ДВС (P_e , соответствующая s_{lim} , и $P_{e,пр}$, соответствующая $s_{кр,lim}$) при частоте напряжения f_1 для $u_{МЧТ} = 103$.
 Figure 7 — TIM slip s_{lim} , $s_{кр,lim}$ and ICE power (P_e , corresponding to the s_{lim} , and $P_{e,пр}$, corresponding to the $s_{кр,lim}$) at the voltage frequency f_1 for $u_{МЧТ} = 103$

и предельного режимов графики совпадают (см. рисунок 7) и $s < s_n$, в точке B $s = s_n$, на участке AB для номинального режима $s_{lim} = s_n$ и ограничение по s_n , а для предельного на участке $A'B'$ ограничение по M_ϕ при $\delta_{доп}$ и $s_n < s_{кр,lim} < s_{кр(f)}$. По графику на рисунке 9, показывающему силу тяги на крюке $F_{кр,пр}$, которой будет соответствовать скорость $v_{д,пр}$ при $s = s_{кр,lim}$ для $u_{МЧТ} = 64,85$ и $u_{МЧТ} = 140$, видно, что левее точки C $F_{кр,доп}$ будет обеспечена согласно расчетам, поэтому разгон до работы на скоростях, соответствующих пахоте (порядка 10 км/ч для плуга [23]), также будет обеспечен при работе на всех рассматриваемых передачах, при этом s_n на рабочем участке CD превышено не будет (см. рисунок 7).

Если взять $P_{e,max}$ не 190, а 220 кВт, то на участке CD будет ограничение не по P_{ice} , а по s_n ($s = s_n$, $P_e < P_{e,max}$, рисунок 10), расположение точек C , C' , D' несколько изменится. На остальных участках ограничения остаются такими же, на участке $C'D'$ будет $s_n < s_{кр,lim} < s_{кр(f)}$ вместо $s_{кр,lim} = s_{lim} < s_n$.

Заключение. Разработана методика для оценки тяговых возможностей трактора и определения

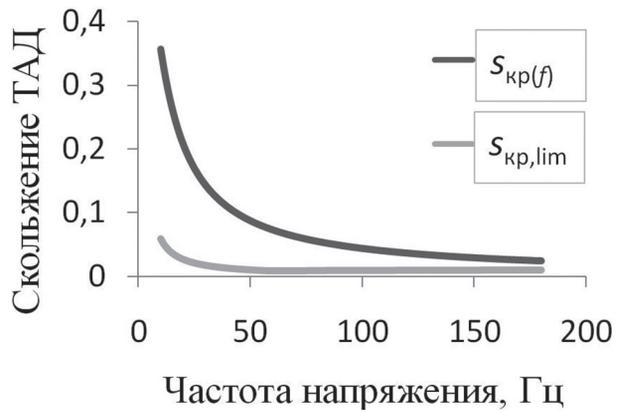


Рисунок 8 — Сравнение значений теоретически возможного критического скольжения ТАД с предельно допустимым скольжением $s_{кр,lim}$
 Figure 8 — Comparison of the values of the theoretically possible critical slip TIM with the maximum permissible slip $s_{кр,lim}$

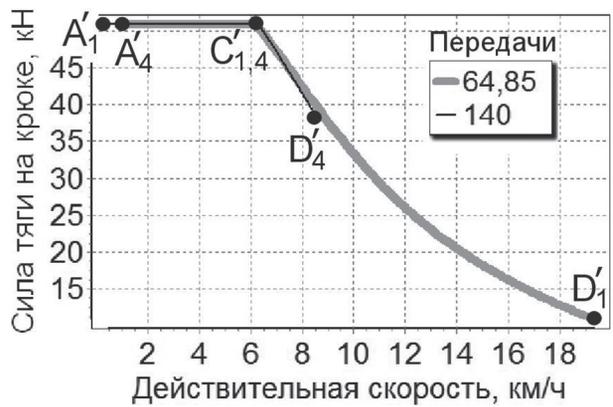


Рисунок 9 — Сила тяги на крюке $F_{кр,пр}$, соответствующая действительной скорости движения трактора $v_{д,пр}$ при $s = s_{кр,lim}$ для передаточных отношений МЧТ 64,85 и 140
 Figure 9 — Drawbar pull $F_{кр,пр}$, corresponding to the actual speed of the tractor $v_{д,пр}$ at $s = s_{кр,lim}$ for the gear ratios of MPPT 64.85 and 140

действительной скорости его движения v_d с учетом трех ограничений: по заданному допустимому буксованию, предельной мощности применяемого ДВС и допустимому скольжению ТАД.

Расчеты с использованием методики показали, что с увеличением $u_{МЧТ}$ будет больше и участок BC диапазона частот ТАД, на котором скольжение ТАД ограничено ($s_{lim} < s_n$), исходя из $M_{ТАД} \leq M_{ТАД,сц}$ (см. рисунок 5), а при одной и той же частоте скольжение s_{lim} будет меньше при большем $u_{МЧТ}$. Это значит, что с увеличением передаточного отношения ТАД будут хуже использоваться возможности ТАД. Согласно графику, показывающему действительную скорость трактора и силу тяги на крюке (см. рисунок 3), с уменьшением значения $u_{МЧТ}$ выше значения v_T и больше диапазон скоростей; с уменьшением $u_{МЧТ}$ расширяется участок CD , на котором можно работать на пахоте: скорость, соответствующая точке C , одинакова для всех $u_{МЧТ}$, а скорость, соответствующая точке D , будет увеличиваться с уменьшением $u_{МЧТ}$. По расчету $F_{кр}$ при $s = s_{lim}$ уже видны верхняя и нижняя границы $u_{МЧТ}$ для рабочих режимов

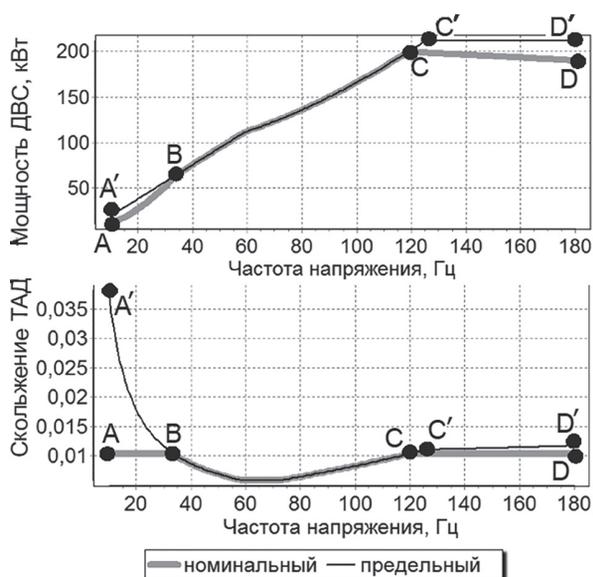


Рисунок 10 — Скольжение s_{lim} , $s_{\text{кр,lim}}$ ТАД и мощность ДВС (P_e , соответствующая s_{lim} и $P_{e,\text{пр}}$, соответствующая $s_{\text{кр,lim}}$) при частоте напряжения f_1 для $u_{\text{мчт}} = 103$
 Figure 10 — TIM slip s_{lim} , $s_{\text{кр,lim}}$ and ICE power (P_e , corresponding to s_{lim} and $P_{e,\text{пр}}$, corresponding to $s_{\text{кр,lim}}$) at the voltage frequency f_1 for $u_{\text{мчт}} = 103$

трактора (слишком большое значение $u_{\text{мчт}}$ приведет к необеспечению всего диапазона рабочих скоростей на пахоте (аналогично $u_{\text{мчт}} = 140$), а слишком малое — к превышению s_n для обеспечения $F_{\text{кр}} = F_{\text{кр,доп}}$ рабочей скорости, соответствующей точке C (аналогично $u_{\text{мчт}} = 29$ [1]).

Чем меньше $u_{\text{мчт}}$ — тем раньше наступает момент, когда при снижении скорости на участке A'C' скольжение ТАД должно превысить номинальное s_n (точка B, см. рисунки 3, 4) для обеспечения $F_{\text{кр,доп}}$, однако трактор на любой из рассматриваемых передач может выполнить разгон до скоростей, соответствующих точке B, развиг на колесах момент, равный M_ϕ при $\phi_{\text{доп}}$ (и $F_{\text{кр}} = F_{\text{кр,доп}}$, см. рисунок 9) при $s_n < s_{\text{кр,lim}} < s_{\text{кр}(f)}$ (участок A'B, см. рисунок 7), а не $s_{\text{lim}} \leq s_n$; это возможно, поскольку для расчета при всех передачах во всем диапазоне $s_{\text{кр,lim}} < s_{\text{кр}(f)}$ (график для $u_{\text{мчт}} = 71,83$ приведен на рисунке 8).

Список литературы

1. 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>.
2. 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>.
3. 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.]. — 2014. — № 3. — С. 88–94.
4. Методика расчета теоретической тяговой характеристики колесного трактора с электромеханической трансмис-

- сией / В.В. Гуськов [и др.] // 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. 40–46.
5. 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.
6. Торопцев, Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок / Н.Д. Торопцев. — М.: Энергопрогресс, 2004. — 88 с.
7. Жданович, Ч.И. Выбор мощности генератора электромеханической трансмиссии / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Автомобиле- и тракторостроение: материалы междунар. науч.-практич. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: отв. ред. Д.В. Капский [и др.]. — Минск: БНТУ, 2018. — Т. 1. — С. 53–57.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Жданович, Ч.И. Определение допустимого скольжения тягового асинхронного электродвигателя трактора исходя из ограничения передаваемой ему мощности / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе сегодня и завтра: сб. тезисов докл. 4-й междунар. науч.-практич. конф., Гомель, 4 нояб. 2020 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2020. — С. 164–167.
13. Жданович, Ч.И. Определение тока статора тягового асинхронного электродвигателя трактора / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр.: в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т, Автотракторный факультет; редкол.: Д.В. Капский (отв. ред.) [и др.]. — Минск: БНТУ, 2020. — Т. 1. — С. 207–212.
14. 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.
15. Калинин, Н.В. Механические потери в тяговом асинхронном электродвигателе трактора / Н.В. Калинин // Наука — образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. — Минск: БНТУ, 2014. — Т. 2. — С. 10.
16. Жданович, Ч. Влияние типа движителя на тягово-сцепные свойства трактора / Ч. Жданович, В. Бойков, Ю. Атаманов // Zeszyty Naukowe. Mechanika. — 2000. — № 47(228). — Рр. 247–255.
17. 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.]. — 2020. — Вып. 9. — С. 131–135.
18. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск: Беларуская навука, 2019. — 207 с.
19. Электрогенератор асинхронный ТАГ2М280-310 и электродвигатель асинхронный ТАД2М280-310: ТУ 16-12 ВАКИ. 526622. — Введ. впервые. — ОАО «НИПТИЭМ», 2012. — 29 с.

20. Кондаков, Л.А. Матричные преобразователи частоты [Электронный ресурс] / Л.А. Кондаков, А.А. Шукин // Журнал ИСУП. — 2013. — № 1(43). — Режим доступа: <https://isup.ru/articles/47/4353/>. — Дата доступа: 28.10.2020.
21. Жданович, Ч.И. Построение графических зависимостей в среде Delphi XE по результатам расчета характеристик трактора с электромеханической трансмиссией / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Автомобиле- и тракторостроение: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–27 мая 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: отв. ред. Д.В. Капский [и др.]. — Минск: БНТУ, 2019. — Т. 1. — С. 266–270.
22. Жданович, Ч.И. Универсальный график для отображения характеристик трактора с электромеханической трансмиссией [Электронный ресурс] / Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин // Научные решения проблем развития тракторной техники, многоцелевых колесных и гусеничных машин, городского электротранспорта: сб. науч. тр. Белорус. нац. техн. ун-т, посвящ. 65-летию кафедры «Тракторы», 20–21 янв. 2019 г. / редкол.: В.П. Бойков (отв. ред.) [и др.]. — Минск: БНТУ, 2019. — С. 14–22. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/59035/14-22.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. — Дата доступа: 29.10.2020.
23. Плуг ППО-9-45К [Электронный ресурс] // ОАО «Минской ремонтный завод». — Режим доступа: <http://mgz.by/catalog/products-catalog/zashita-ressora/plug-ppo-8-40k.html>. — Дата доступа: 10.07.2020.

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 26 January 2021.

REALIZATION OF TRACTION CAPABILITIES OF A TRACTOR WITH AN ELECTROMECHANICAL POWER TRAIN

A method has been developed to assess the traction capabilities of a tractor with an electromechanical power train and determine the actual speed taking into account three restrictions: on the permissible slip of the tractor, the maximum power of the used internal combustion engine (ICE) and the permissible mode of operation of the traction induction motor (TIM). The developed mathematical model makes it possible to determine the drawbar pull and the actual speed of the tractor when regulating the TIM in the entire operating frequency range of the voltage supplied to the TIM for a comparative assessment of the traction capabilities of the tractor when using different gear ratios of the mechanical part of the power train (MPPT), as well as determine the slip and other parameters of the TIM when it works as a part of the electromechanical power train of the tractor. Calculations show that: 1) if the MPPT ratio is too high, the whole range of tractor operating speeds on the plowing will not be provided, and if the MPPT ratio is too low, the tractor will not be able to develop the maximum possible drawbar pull based on the permissible slip at any voltage frequency from the TIM control range without exceeding the nominal mode of operation of the TIM; 2) the higher the TIM gear ratio, the larger the section of the TIM frequency control range will be, in which the TIM will not be able to develop even the nominal slip due to the restriction on the permissible slip of the tractor, and for the same frequencies in this section, the TIM slip will be more limited at a higher MPPT gear ratio; the lower the transmission ratio of the MPPT, the more the nominal slip of the TIM will be exceeded during acceleration of the tractor with maintaining the maximum possible based on the permissible slip of the thrust force from the minimum speed to the speeds corresponding to plowing.

Keywords: tractor, electromechanical power train, drawbar pull, slip, permissible slip, engine power, actual speed, current, voltage frequency

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-5-14>

References

- Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Analiz effektivnosti ispolzovaniya nakopiteley energii na traktore s elektromekhanicheskoy transmisyey [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.).
- 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.).
3. Amelchenko P.A., Zhykovskiy I.N., Pugachev A.P., Kaminskiy P.F., Stasilevich A.G., Klyuchnikov A.V. Tyagovyy elektropivod i elektroobor moshchnosti kak etap razvitiya teorii i konstruksii selskokhozyaystvennogo traktora [Electric traction drive and energy electroselection as the stage of theory and farm tractor construction development]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2014, iss. 3, pp. 88–94 (in Russ.).
 4. Guskov V.V., Zezetko N.I., Koltovich I.A., Klyuchnikov A.V., Stasilevich A.G. Metodika rascheta teoreticheskoy tyagovoy kharakteristiki kolesnogo traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy [Method of calculating the theoretical traction characteristics of a wheeled tractor with an electromechanical transmission]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu kafedry "Traktory" BNTU "Problemy proektirovaniya i razvitiya traktorov, mobilnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta"* [Proc. International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the department "Tractors" of BSTU "Problems of design and development of tractors, mobile machines, urban electric transport"]. Minsk, 2013, pp. 40–46 (in Russ.).
 5. Guskov V.V., et al. *Traktory. Teoriya* [Tractors. Theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p. (in Russ.).
 6. Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory dlya avtonomnykh elektroenergeticheskikh ustanovok* [Asynchronous generators for autonomous electric power units]. Moscow, Energoprogres Publ., 2004. 88 p. (in Russ.).
 7. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Vybor moshchnosti generatora elektromekhanicheskoy transmissii [The choice of power generator in electromechanical transmission]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Avtomobile- i traktorostroenie"* [Proc. International scientific and practical conference "Automobile and tractor construction"]. Minsk, 2018, vol. 1, pp. 53–57 (in Russ.).
 8. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Opredelenie maksimalnogo momenta na kolesakh traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy [Determination of the maximum torque on the wheels of a tractor with an electromechanical transmission]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu kafedry "Traktory" BNTU "Problemy proektirovaniya i razvitiya traktorov, mobilnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta"* [Proc. International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the department "Tractors" of BSTU "Problems of design and development of tractors, mobile machines, urban electric transport"]. Minsk, 2013, pp. 54–59 (in Russ.).
 9. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Vybor sposoba regulirovaniya tyagovogo asinkhronnogo elektrodvigatelya traktora i postroenie 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.).
 10. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 463 p. (in Russ.).
 11. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Zavisimost kharakteristik traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy ot temperatury obmotok tyagovogo elektrodvigatelya [Dependence of characteristics of a tractor with an electromechanical transmission on temperature of traction motor windings]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu kafedry "Traktory" BNTU "Problemy proektirovaniya i razvitiya traktorov, mobilnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta"* [Proc. International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the department "Tractors" of BSTU "Problems of design and development of tractors, mobile machines, urban electric transport"]. Minsk, 2013, pp. 60–67 (in Russ.).
 12. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Opredelenie dopustimogo skolzheniya tyagovogo asinkhronnogo elektrodvigatelya traktora iskhodya iz ogranicheniya peredavaemoy emu moshchnosti [Determination of the permissible slip of the traction asynchronous electric motor of the tractor based on the limitation of the power transmitted to it]. *Sbornik tezisev dokladov 4 mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse segodnya i zavtra"* [Collection of abstracts of papers of the 4th International scientific and practical conference "Innovative technologies in the agro-industrial complex today and tomorrow"]. Gomel, 2020, pp. 164–167 (in Russ.).
 13. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Opredelenie toka statora tyagovogo asinkhronnogo elektrodvigatelya traktora [Calculation of the stator current of a tractor propulsion induction motor]. *Avotraktorostroenie i avtomobilnyy transport*, 2020, vol. 1, pp. 207–212 (in Russ.).
 14. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (in Russ.).
 15. Kalinin N.V. Mekhanicheskie poteri v tyagovom asinkhronnom elektrodvigatele traktora [Mechanical losses in the tractor traction asynchronous motor]. *Materialy 12 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nauka — obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike"* [Proc. International scientific and technical conference "Science — to education, production, economy"]. Minsk, 2014, vol. 2, p. 10 (in Russ.).
 16. Zhdanovich Ch., Boykov V., Atamanov Yu. Vliyaniye tipa dvizhitelya na tyagovo-stsepnyye svoystva traktora [Influence of the type of propulsion unit on the traction properties of the tractor]. *Zeszyty Naukowe. Mechanika*, 2000, iss. 47(228), pp. 247–255 (in Russ.).
 17. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Tyagovyy KPD traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy [Traction efficiency of a tractor with an electromechanical power train]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2020, iss. 9, pp. 131–135 (in Russ.).
 18. Poddubko S.N., et al. *Traktory 21 veka: sostoyaniye i perspektivy* [Tractors of the 21st century: state and prospects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 207 p. (in Russ.).
 19. TU 16-12 VAKI. 526622. *Elektrogenerator asinkhronnyy TAG2M280-310 i elektrodvigatel asinkhronnyy TAD2M280-310* [Asynchronous electric generator TAG2M280-310 and asynchronous electric motor TAD2M280-310]. OAO "NIPTIEM" Publ., 2012. 29 p. (in Russ.).
 20. Kondakov L.A., Shchukin A.A. Matrichnyye preobrazovateli chastoty [Matrix frequency converters]. *Zhurnal ISUP*, 2013, no. 1(43). Available at: <https://isup.ru/articles/47/4353/> (accessed 28 October 2020) (in Russ.).
 21. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Postroenie graficheskikh zavisimostey v srede Delphi XE po rezul'tatam rascheta kharakteristik traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy [Building the performance characteristic for a tractor equipped with an electromechanical power train in an environment Delphi XE]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Avtomobile- i traktorostroenie"* [Proc. International scientific and practical conference "Automobile and tractor construction"]. Minsk, 2019, vol. 1, pp. 266–270 (in Russ.).
 22. Zhdanovich Ch.I., Kalinin N.V. Universalnyy grafik dlya otobrazheniya kharakteristik traktora s elektromekhanicheskoy transmissiy [The universal graphic for mapping of characteristics of the tractor equipped with electromechanical power]. *Nauchnye resheniya problem razvitiya traktornoy tekhniki, mnogotselyevykh kolesnykh i gusenichnykh mashin, gorodskogo elektrotransporta*, 2019, pp. 14–22. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/59035/14-22.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 29 October 2020) (in Russ.).
 23. *Plug PPO-9-45K* [Plough PPO-9-45K]. Available at: <http://mrz.by/catalog/products-catalog/zashita-ressora/plug-ppo-8-40k.html> (accessed 10 July 2020) (in Russ.).