

ОСОБЕННОСТИ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАКТОРОВ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

С. Н. Девянин, А. В. Бижаев

*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
(г. Москва, Российская Федерация)*

***Аннотация:** В перспективе двигатель внутреннего сгорания уступит место электрической машине и выбор такого силового агрегата для трактора нужно начинать уже сейчас. В работе рассмотрена возможность оценки характеристик двигателя для тяговых задач трактора.*

***Ключевые слова:** трактор; тяговая характеристика; двигатель; электродвигатель; выбор двигателя.*

FEATURES OF TRACTION CHARACTERISTICS OF TRACTOR WITH ELECTRIC DRIVE

S. N. Devyanin, A. V. Bizhaev

*Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)*

***Abstract:** In the future, the internal combustion engine will give way to an electric machine and the choice of such a power unit for a tractor should be started now. The paper considers the possibility of evaluating the characteristics of the engine for traction tasks of the tractor.*

***Keywords:** tractor; traction characteristic; engine; electric motor; choice of engine.*

До активного внедрения электроприводных технологий, при использовании двигателей внутреннего сгорания на мобильных машинах рассматривался ряд проблем, связанных с выбросом токсичных компонентов отработавших газов и сравнимо невысокого КПД. Производители применяют ряд способов для решения этих проблем, одним из которых является применение альтернативных топлив. Наиболее перспективным и распространённым использованием в качестве альтернативного топлива является газ,

который часто применяется в газодизельном процессе [1]. В Европе также распространено использование биотоплив, большинство исследований которых показывают положительную динамику изменения вредных продуктов сгорания [2]. Для дизельных ДВС, используемых на тракторах и других сельскохозяйственных машинах одним из основных и наиболее опасных токсичных компонентов являются оксиды азота NO_x , образование которых связано с высокой температурой в камере сгорания в дизеле [3]. На фоне применения альтернативных топлив, существуют более эффективные способы снижения доли содержания оксидов азота, такие как добавки воды в камеру сгорания [4]. Однако подобные способы не получили широкого распространения ввиду множества факторов, в том числе и потребительских.

На сегодняшний день технологический уровень позволяет заменить все эти способы вытеснением ДВС экологически чистым электроприводом, который обладает необходимой характеристикой, способной реализовать функции мобильной машины. С ростом возможности применения электрических трансмиссий на сельскохозяйственных тракторах появилась необходимость в разработке концепции такой технологии, алгоритмов её управления и анализе соответствующих характеристик.

Характеристики ДВС принято представлять в виде внешней скоростной характеристики (зависимости показателей двигателя от частоты вращения) или для тракторов и комбайнов в виде регуляторной характеристики (зависимости показателей от эффективной мощности) [5, 6]. Однако в таком представлении характеристик двигателя сложно сразу оценить изменение тяговой характеристики трактора при использовании двигателей с различными характеристиками.

Такую ситуацию можно исправить, если характеристику двигателя представить в виде зависимости показателей от крутящего момента на коленчатом валу. Это связано с тем, что величина касательной силы тяги P_k на ведущих колесах связана с крутящим моментом двигателя M_k зависимостью:

$$P_k = \frac{M_k i_{\text{тр}} - M_{\text{тр}}}{r_d}, \quad (1)$$

где $i_{\text{тр}}$ – передаточное отношение трансмиссии трактора; $M_{\text{тр}}$ – механические потери в трансмиссии; $r_{\text{д}}$ – динамический радиус ведущего колеса трактора.

Сила тяги на крюке трактора $P_{\text{кр}}$ при движении по горизонтальному участку получается из имеющейся касательной силы тяги $P_{\text{к}}$ за вычетом силы сопротивления качению $P_{\text{ф}}$:

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{к}} - P_{\text{ф}} \quad (2)$$

При работе трактора на какой-то определенной передаче передаточное отношение $i_{\text{тр}}$ не меняется, механические потери в трансмиссии $M_{\text{тр}}$, динамический радиус колеса $r_{\text{д}}$ и силу сопротивления качению $P_{\text{ф}}$ в первом приближении можно принять постоянными. В таком случае силу тяги на крюке $P_{\text{кр}}$ после подстановки выражения (1) в (2) и преобразования получим в виде:

$$P_{\text{кр}} = C_1 \cdot M_{\text{к}} - C_2, \quad (3)$$

где C_1 и C_2 – постоянные величины при данных условиях движения трактора.

Постоянная C_1 зависит от радиуса колеса и передаточного отношения трансмиссии, а C_2 – от величины потерь энергии в трансмиссии отнесенной к радиусу колеса и от качения колес. Таким образом, по осям абсцисс в тяговой характеристике трактора и характеристике двигателя перестроенной в виде зависимости от крутящего момента будут показатели, различающиеся на постоянную величину для каждого передаточного отношения трансмиссии.

На тяговой характеристике трактора принято представлять изменение скорости движения трактора, крюковой мощности, удельного крюкового расхода топлива, коэффициента буксования и тягового КПД [5, 6].

Взаимосвязь между частотой вращения вала двигателя n и скоростью трактора V при коэффициенте буксования δ и кинематическом радиусе колеса $r_{\text{к}}$ может быть выражена в виде:

$$V = 0,105 \cdot n \cdot r_{\text{к}} / i_{\text{тр}} \cdot (1 - \delta) \quad (4)$$

Величина крюковой мощности $N_{\text{кр}}$ находится как произведение скорости трактора V и силы тяги $P_{\text{кр}}$, и может быть выражена через эффективную мощность двигателя $N_{\text{е}}$ при использовании зависимостей (3) и (4) и преобразования в виде зависимости:

$$N_{\text{кр}} = (C_3 \cdot N_{\text{е}} - C_4 \cdot n) \cdot (1 - \delta), \quad (5)$$

где C_2 – постоянная, зависящая от соотношения r_k и r_d , и C_4 – постоянная, зависящая от постоянных C_1 и C_2 . Таким образом, искажение кривой крюковой мощности от N_e увеличивается с ростом частоты вращения двигателя и величины буксования. Так как величина потерь энергии в трансмиссии на режимах близких к номинальному не превышает 20 % и буксование также обычно меньше 20 % [5, 6], то существенного искажения протекания кривых мощности быть не должно.

Тяговый КПД является отношением $\eta_T = N_{кр}/N_e$ и его изменение определяется зависимостью (5), а удельные расходы топлива двигателя g_e и крюковой $g_{кр}$ связаны соотношением:

$$g_{кр} = g_e / \eta_T \quad (6)$$

На рисунке 1 в качестве примера приведены перестроенная характеристика двигателя и тяговая характеристика трактора с этим двигателем. Из рисунка можно заметить хорошее согласование протекания описанных выше показателей. Таким образом, на основании изложенного можно по сопоставлению характеристик двигателя сделать оценку тяговых качеств трактора без построения его тяговой характеристики.

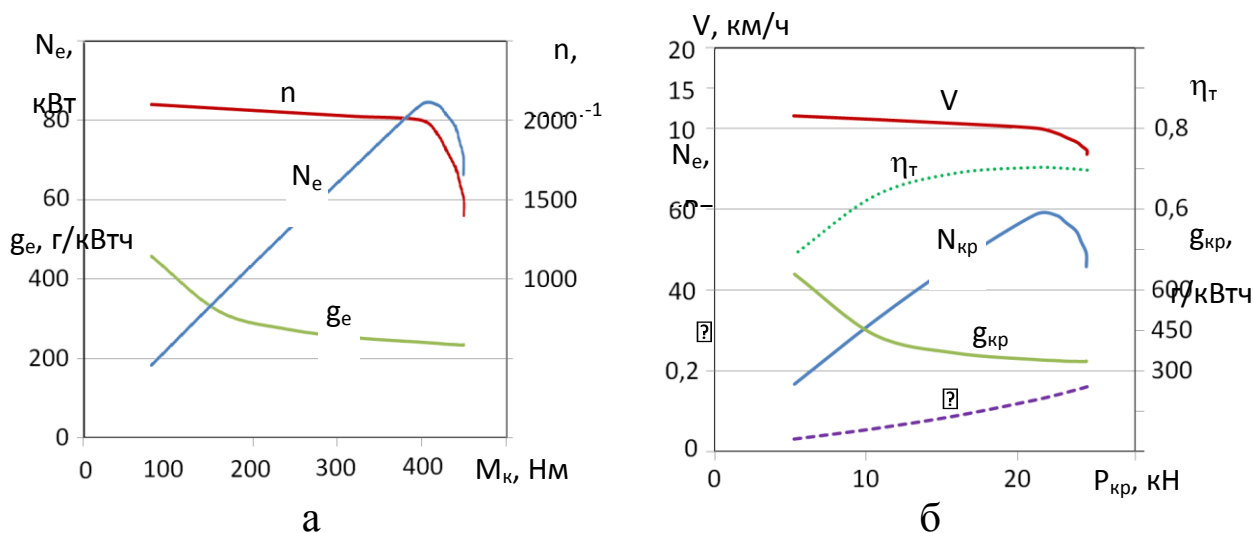


Рисунок 1 – Тяговые характеристики: а – двигателя; б – трактора

На основании изложенного материала сделано сопоставление характеристик тяговых электродвигателей \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 и дизеля Д в относительных единицах, которые показаны на рисунке 2. Характеристики электродвигателей, взятые для рассмотрения, яв-

ляются общепринятыми и образуются в результате естественных физических процессов с возможным моделированием [7, 8].

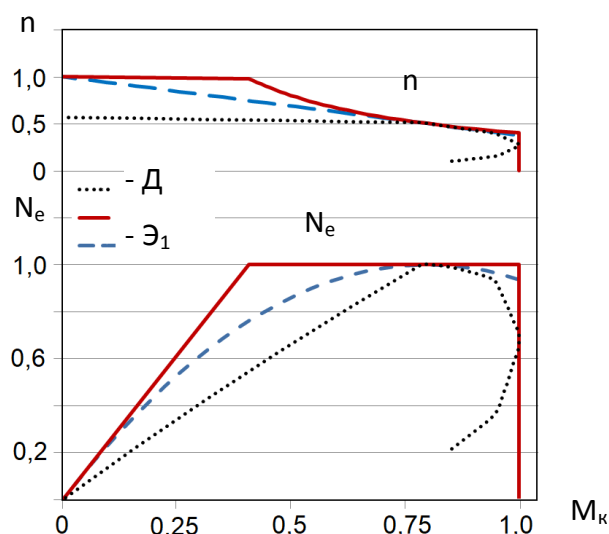


Рисунок 2 – Тяговые характеристики двигателей: Д – дизель; Э₁ – асинхронный с частотным управлением; Э₂ – коллекторный постоянного тока

Как следует из представленных на рисунке 2 данных, для тяговых задач трактора по мощности N_e электродвигатели имеют лучше характеристики, чем дизель [9, 10], т. к. в зоне максимальных значений N_e они имеют большую протяженность по крутящему моменту. Между электродвигателями лучше протекает характеристика у двигателя Э₁ чем у Э₂.

При сопоставлении изменения частоты вращения n (скорости трактора) в основной зоне изменения крутящего момента двигателя дизель имеет меньше изменение частоты вращения (более стабильное движение трактора), чем электродвигатели. Для поддержания заданной скорости движения трактора с электродвигателем понадобится дополнительное управление частотой вращения двигателя при снижении нагрузки.

В заключении следует отметить, что электродвигатель является хорошей заменой ДВС в тракторе для решения тяговых задач и, из рассмотренных, лучше использовать асинхронный электродвигатель с частотным управлением. Для поддержания постоянной скорости движения трактора с электроприводом потребуются в систему управления трактора добавить блок-регулятор скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование биогаза в качестве топлива для дизелей / С. Н. Девянин, В. Л. Чумаков, В. А. Марков, А. А. Ефанов // Грузовик. 2011. № 11. С. 32-43.
2. Экологическая безопасность применения биотоплив в дизелях / М. Н. Ерохин, С. Н. Девянин, В. Л. Чумаков, К. А. Малашенков // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2008. № 5 (14). С. 27-29.
3. Chumakov V. L., Devyanin S. N., Bijaev A. V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine / В сб.: Journal of Physics: Conference Series. Volume 1679. Issue 5. doi:10.1088/1742-6596/1679/5/052089.
4. Бижаев А. В., Девянин С. Н. Результаты экспериментальных исследований добавок воды в камеру сгорания дизельного двигателя // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 2. С. 36-39.
5. Кутьков Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М. : ИНФРА-М, 2014. 506 с.
6. Поливаев О. И., Гребнев В. П., Ворохобин А. В. Теория трактора и автомобиля : учебник. СПб. : Лань, 2016. 232 с.
7. Фаттахов К. М., Фаттахов Р. К. Расчет и построение пусковых характеристик асинхронного двигателя по каталожным данным // Нефтегазовое дело. 2012. № 3. С. 25-31.
8. Шухарев С. А. Моделирование работы двигателя постоянного тока // Вестник института тяги и подвижного состава. Изд-во: Дальневосточный государственный университет путей сообщения (Хабаровск), 2018. № 14. С. 7-12.
9. Бижаев А. В. Проблемы выбора типа привода силового агрегата трактора на электрической тяге // В сб.: Чтения академика В. Н. Болтинского семинар. 2020. С. 247-252.
10. Бижаев А. В. Оценка параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 4. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-0-0.

REFERENCES

1. Devyanin S. N., Chumakov V. L., Markov V. A., Efanov A. A. Ispol'zovanie biogaza v kachestve topliva dlia dizelei [Using biogas as fuel for diesel engines]. *Gruzovik*, 2011, no. 11, pp. 32-43.
2. Erokhin M. N., Devyanin S. N., Chumakov V. L., Malashenkov K. A. Ekologicheskaiia bezopasnost' primeneniia biotopliv v dizeliakh [Ecological safety of the use of biofuels in diesel engines]. *Vestnik Orlovskogo gosudastvennogo agrarnogo universiteta*, 2008, no. 5 (14), pp. 27-29.

3. Chumakov V. L., Devyanin S. N., Bijaev A. V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1679, issue 5. doi:10.1088/1742-6596/1679/5/052089.
4. Bizhaev A. V., Devyanin S. N. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy dobavok vody v kameru sgoraniia dizel'nogo dvigatel'ia [Results of experimental studies of water additions to the combustion chamber of a diesel engine]. *Sel'skokhoziaistvennyye mashiny i tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 36-39.
5. Kut'kov G. M. Traktory i avtomobili. Teoriia i tekhnologicheskie svoistva [Tractors and cars. Theory and technological properties]. INFRA-M, 2014, 506 p.
6. Polivaev O. I., Grebnev V. P., Vorokhobin A. V. Teoriia traktora i avtomobilia [The theory of the tractor and the car]. Saint Petersburg, Lan', 2016, 232 p.
7. Fattakhov K. M., Fattakhov R. K. Raschet i postroenie puskovykh kharakteristik asinkhronnogo dvigatel'ia po kataloghnym dannym [Calculation and construction of starting characteristics of an induction motor according to catalog data]. *Neftegazovoe delo*, 2012, no. 3, pp. 25-31.
8. Shukharev S. A. Modelirovanie raboty dvigatel'ia postoiannogo toka [Modeling the operation of a DC motor]. *Vestnik instituta tiagi i podvizhnogo sostava*, 2018, no. 14, pp. 7-12.
9. Bizhaev A. V. Problemy vybora tipa privoda silovogo agregata traktora na elektricheskoi tiage [Problems of choosing the type of drive of the power unit of a tractor on electric traction]. *Chteniia akademika V. N. Boltinskogo*, 2020, pp. 247-252.
10. Bizhaev A. V. Otsenka parametrov traktora s elektroprivodnym silovym agregatom [Estimation of parameters of a tractor with an electric drive power unit]. *Sel'skokhoziaistvennyye mashiny i tekhnologii*, 2020, vol. 14, no. 4. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-0-0.

Об авторах:

Девянин Сергей Николаевич, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, devta@rambler.ru.

Бижаев Антон Владиславович, старший преподаватель кафедры тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, a.bizhaev@mail.ru.

About the authors:

Sergey N. Devyanin, professor of the Department of Tractors and Cars, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), D.Sc. (Engineering), professor, dev-ta@rambler.ru.

Anton V. Bizhaev, senior lecturer of the Department of Tractors and Cars, Russian Timiryazev State Agrarian University (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), Cand.Sc. (Engineering), a.bizhaev@mail.ru.