

## ОБОСНОВАНИЕ ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА ТРАКТОРЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Н. Н. Пуляев, М. Джапбаров**

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

*Аннотация.* В данной статье описаны основные тенденции развития сельскохозяйственных тракторов, особое внимание уделено тракторам с гибридной компоновкой тягового агрегата. Проводится обоснования работы машинотракторного агрегата. Предложена модель расчёта основных показателей, определяющих характер изменения момента сопротивления на валу электропривода во время сельскохозяйственных работ. Определено основное направление по эффективности использования такого вида тракторов.

*Ключевые слова:* сельское хозяйство; трактора; машинно-тракторный агрегат; оптимальная энергоемкость.

## JUSTIFICATION OF A GAS-ELECTRIC POWER PLANT ON AN AGRICULTURAL TRACTOR

**N. N. Pulyaev, M. Dzhapbarov**

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
(Moscow, Russian Federation)*

*Abstract.* This article describes the main trends in the development of agricultural tractors, special attention is paid to tractors with a hybrid layout of the traction unit. The justification of the machine-tractor unit is carried out. A model for calculating the main indicators that determine the nature of the change in the moment of resistance on the shaft of the electric drive during agricultural work is proposed. The main direction of the efficiency of using this type of tractor is determined.

*Keywords:* agriculture; tractors; machine-tractor unit; optimal energy consumption.

Сельскохозяйственный трактор традиционно является полноприводной многофункциональной техникой, постоянно совер-

шенствующейся во всех направлениях начиная от шин заканчивая экономичным двигателем, передней и задней навеской с быстродействующей сцепкой, многодиапазонной коробкой передач с автоматическим переключением передач без разрыва потока мощности [1].

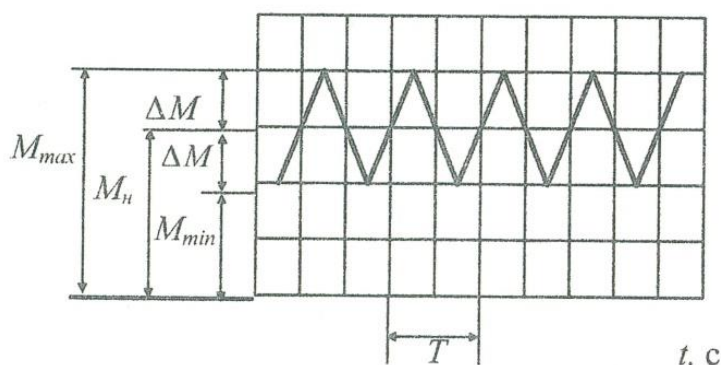
Но по-прежнему основным эксплуатационным показателем машинно-тракторного агрегата (МТА) является его производительность. Выполнение многих сельскохозяйственных работ производится при условии ограничения скорости движения МТА, небольших величинах тягового сопротивления, которые не дают возможности использовать всю мощность тракторного двигателя и не позволяют использовать наиболее экономичные режимы его работы. Кроме того, силы сопротивления движению тракторного агрегата имеют неустановившейся характер и во время работы непрерывно колеблются в довольно значительных пределах. Колебания нагрузки происходят в результате влияния микрорельефа поля, неоднородности почвы, особенностей технологического процесса выполняемой сельскохозяйственной операции, неравномерности сопротивлению и многих других факторов. Колебательный характер нагрузки вызывает необходимость резервировать некоторую часть мощности тракторного двигателя для преодоления систематически возникающих пиковых сопротивлений движению [2].

В связи с необходимостью иметь резерв мощности тракторный агрегат приходится комплектовать таким образом, чтобы его средний приведенный к коленчатому валу момент сопротивления был несколько меньше номинального крутящего момента двигателя. Поэтому при определении потребной мощности тракторного двигателя при тяговом расчете учитывают резерв мощности в пределах 15...20 % [3].

Также не маловажным направлением является экобезопасность на сельскохозяйственном производстве. Необходимо отметить, что из всех отраслей народного хозяйства сельское хозяйство в наибольшей степени зависит от загрязнения окружающей среды. Использование в качестве топлива продуктов перегонки нефти приводит к выбросу огромного количества тяжелых металлов, попадающих в почву.

Изменение сопротивления при постоянной скорости трактора в момент проведения сельскохозяйственных работ носит колебательный характер, т. е. возникают неустановившиеся режимы работы. Для их устранения на трактор может быть установлена газо-электрическая силовая установка, основным элементом которой является электропривод, способный подавать энергию при увеличении нагрузки двигателя и восполнять ее от источника энергии, а также рекуперировать её при не полной загрузке [4].

Если принять во внимание основные показатели, определяющие характер изменения момента сопротивления ( $M_c$ ) на валу электропривода, предположим, что во время сельскохозяйственных работ трактор движется равномерно на определенной территории, почва имеет одинаковый растительный покров, влажность и механические показатели остаются неизменными. Затем нагрузка может быть представлена графиком, показанным на рис. 1.



**Рисунок 1 – Идеализированный характер изменения нагрузки сопротивления тракторного агрегата**

Из рис. 1 нагрузки видно, что:

$$M_n = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}, \quad (1)$$

где  $M_n$  – номинальный момент развиваемый электроприводом, Н м.

Уровень неравномерности, характеризующий изменение момента сопротивления выражается коэффициентом:

$$\delta = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_n}, \quad (2)$$

Затем преобразовывая выражения (1) и (2) получим уравнение для определения приращения момента  $\pm\Delta M$ :

$$\Delta M = \frac{\delta}{2} M_n \quad (3)$$

Другой показатель – период изменения  $T$ . Чем больше период  $T$ , т. е. чем дольше увеличивается ( $M_c$ ), тем значительнее влияние этого периода на работу привода [5].

Динамика изменения в момент сопротивления представляет собой сложную периодическую функцию, которую можно представить в виде конstitutивных синусоид различных колебаний, из которых одно фундаментальное колебание имеет наибольший период. Предположим, что нагрузка изменяется по синусоиде, показанной на рисунке 2 с периодом колебаний, равным  $T$  [6]. В данном случае для пульсирующего синусоидального характера нагрузки уравнения момента сопротивления для любого момента времени выражается как

$$M_c = M_n + \Delta M \sin \Omega t = M_n + \frac{\delta M_n}{2} \sin \Omega t = M_n \left( 1 + \frac{\delta}{2} \sin \Omega t \right), \quad (4)$$

где  $t$  – время, по истечении которого определяется величина  $M_c$ , с;

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}.$$

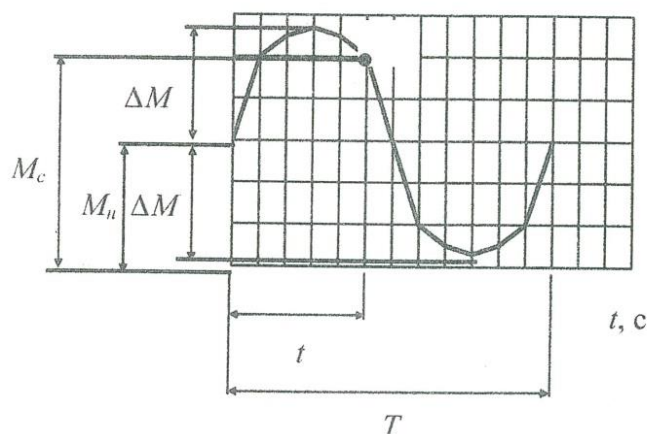


Рисунок 2 – Характер изменения нагрузки за период колебания

Используя это выражение, мы можем построить диаграмму момента сопротивления как непрерывную цепь волн с всевозможными максимальными значениями функции  $\Delta M$  с периодами  $T$ .

Номинальный момент сопротивления на валу электропривода можно определить из выражения:

$$M_H = \frac{(F_H + f \cdot G_m) \cdot V_H}{\eta_{тр} \cdot \omega}, \quad (5)$$

где  $F_H$  – номинальная сила тяги на крюке, Н;  $f$  – коэффициент сопротивления качению трактора при работе с номинальной силой тяги на крюке;  $G_T$  – вес трактора, Н;  $V_H$  – номинальная скорость движения трактора соответствующая номинальному тяговому усилию, м/с;  $\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии.

Имея сведения из выражений (4) и (5) про значения номинального момента сопротивления и пульсирующего синусоидального характера его изменения на валу электропривода, преобразуем:

$$M_c = \frac{(F_H + f \cdot G_T) \cdot V_H \cdot \left(1 + \frac{\delta}{2} \sin \Omega t\right)}{\eta_{тр} \cdot \omega} \quad (6)$$

Неустановившиеся режимы, возникающие в электроприводе в результате изменения нагрузки, опишем уравнением движения привода:

$$M_{тэд} - M_H = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

где  $J \frac{d\omega}{dt}$  – инерционный или динамический момент на валу электропривода, кг /м<sup>2</sup>

Используя полученные уравнения, можно провести моделирование характера работы трактора с газомоторным двигателем в зависимости от изменения момента сопротивления на валу электропривода [6].

Полностью учесть эти сложные явления аналитическими методами практически невозможно. В связи с этим оптимальная степень загрузки двигателя определяется в эксплуатационных расчетах с учетом существующих рекомендаций, полученных на основе обобщения результатов многих экспериментальных исследований. Условия оцениваются с помощью коэффициента вариации момента сил сопротивления на валу двигателя  $\delta$ . В качестве основного критерия ресурсосбережения используется минимальный удельный расход топлива двигателем:  $g \rightarrow \min$ , показа-

тели которого можно улучшить путём применения альтернативных видов топлива [7].

Оптимальную степень нагрузки двигателя в функции можно определять по значению  $M_c$  в соответствии с формулой (6).

Вариацию с критерием  $g \rightarrow \min$  по значению и соответственно энергоёмкости накопителя  $E_\Sigma$  (кДж) приведены в таблице для двигателей наиболее распространенных марок.

**Таблица – Оптимальная энергоёмкость накопителя  $E_\Sigma$  (кДж) в зависимости от коэффициента вариации момента сил сопротивления**

Двигатель	$E_\Sigma$ при		
	$\delta = 10 \%$	$\delta = 20 \%$	$\delta = 30 \%$
Д-243	60	120	180
ВТ-90-А	70	140	210
ЯМЗ-238	180	360	540

Таким образом, по данной методике расчёта можно рассчитать оптимальную частоту вращения вала двигателя при максимальной нагрузке. Для повышения эффективности работы тракторного двигателя планируется использовать альтернативные виды топлива – природный газ, с целью получения минимального расхода топлива в изменяющихся условиях работы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дидманидзе О. Н., Гузалов А. С. Перспектива создания электрического трактора // В сборнике: Доклады ТСХА. 2019. С. 3-6.
2. Теория проектирования транспортных средств с комбинированными энергоустановками / Д. Г. О. Асадов, С. А. Иванов, А. С. Гузалов, Н. А. Большаков. М. : ООО «Автограф», 2019. 119 с.
3. Гузалов А. С. Оценка технических характеристик силовых установок на базе трактора МТЗ-920 // В сб.: Автотранспортная техника XXI века : сборник статей III Международной научно-практической конференции. 2018. С. 77-86.
4. Дидманидзе О. Н., Гузалов А. С., Большаков Н. А. Современный уровень развития двигателей с газомоторной и электрической силовой установками на транспортно-тяговых средствах // Международный технико-экономический журнал. 2019. № 4. С. 52-59.

5. Чутчева Ю. В., Пуляев Н. Н., Коротких Ю. С. Перспективные направления развития тягово-транспортных средств для сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 9 (279). С. 2-5.
6. Столяров Д. М., Коротких Ю. С., Пуляев Н. Н. Анализ современных двигателей внутреннего сгорания с электросиловыми установками // *Наука без границ*. 2019. № 6 (34). С. 56-59.
7. Новиков Е. В., Гузалов А. С. Тенденции развития мощностных показателей на автомобильных двигателях // В сб.: *Перспективные направления развития автотранспортного комплекса : сборник статей XIV Международной научно-практической конференции*. Пенза, 2020. С. 54-57.
8. Математическая модель процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре газового двигателя / М. Н. Ерохин, О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, Р. Т. Хакимов // В сб.: *Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения)*. Сборник статей семинара. Под редакцией М.Н. Ерохина. 2019. С. 19-28.
9. Дидманидзе О. Н., Иванов С. А., Карев А. М. Основные направления развития тягово-транспортных средств в АПК // *Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии (см. в книгах)*. 2015. Т. 1. № 287-2. С. 180-182.
10. Техническая эксплуатация автомобилей / О. Н. Дидманидзе, А. А. Солнцев, Д. Г. О. Асадов, В. С. Богданов, Е. П. Парлюк, С. А. Иванов, Н. Н. Пуляев, Г. Е. Митягин, В. В. Сильянов. М. : ФГБНУ «Росинформгротех», 2017. 564 с.

## REFERENCES

1. Didmanidze O. N., Guzalov A. S. Prospects for creating an electric tractor. *Doklady TSKhA*. 2019. pp. 3-6.
2. Asadov D. G. O., Ivanov S. A., Guzalov A. S., Bol'shakov N. A. Theory of design of vehicles with combined power plants. Moscow, Avtograf, 2019, 119 p.
3. Guzalov A. S. Evaluation of technical characteristics of tractor-based power plants MTZ-920. *Avtotransportnaia tekhnika XXI veka*, 2018, pp. 77-86.
4. Didmanidze O. N., Guzalov A. S., Bol'shakov N. A. The current level of development of engines with gas-engine and electric power plants on transport and traction vehicles. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal*, 2019, no. 4, pp. 52-59.
5. Chutcheva Yu. V., Pulyaev N. N., Korotkikh Yu. S. Promising directions of development of traction vehicles for agriculture. *Tekhnika i oborudovanie dlia sela*, 2020, no. 9 (279), pp. 2-5.

6. Stoliarov D. M., Korotkikh Yu. S., Pulyaev N. N. Analysis of modern internal combustion engines with electric power plants. *Nauka bez granits*, 2019, no. 6 (34), pp. 56-59.
7. Novikov E. V., Guzalov A. S. Trends in the development of power indicators on automobile engines. *Perspektivnye napravleniia razvitiia avtotransportnogo kompleksa*, Penza, 2020, pp. 54-57.
8. M. N. Erokhin, O. N. Didmanidze, E. P. Parliuk, R. T. Khakimov Mathematical model of the process of combustion and heat release in the cylinder of a gas engine. *Chteniia akademika V.N. Boltinskogo*, 2019, pp. 19-28.
9. Didmanidze O. N., Ivanov S. A., Karev A. M. The main directions of development of traction vehicles in the agro-industrial complex. *Doklady Timiriazevskoi sel'skokhoziaistvennoi akademii*, 2015, vol. 1, no. 287-2, pp. 180-182.
10. Didmanidze O. N., Solntsev A. A., Asadov D. G. O., Bogdanov V. S., Parliuk E. P., Ivanov S. A., Pulyaev N. N., Mitiagin G. E., Sil'ianov V. V. Technical operation of vehicles. Moscow, Rosinformagrotekh, 2017, 564 p.

***Об авторах:***

**Пуляев Николай Николаевич**, доцент 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, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, [inpo.msau@gmail.com](mailto:inpo.msau@gmail.com).

**Джапбаров Мердан**, магистрант Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49).

***About the authors:***

**Nikolai N. Pulyaev**, associate professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), Cand.Sc. (Engineering), associate professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8984-4426>, [inpo.msau@gmail.com](mailto:inpo.msau@gmail.com).

**Merdan Dzhapbarov**, master's degree student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49).