

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

д.т.н. Гусаров В.А., д.т.н. Годжаев З.А.

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия
cosinys50@mail.ru, fic51@mail.ru

В работе рассматривается использование дизель-электрических энергетических установок на мобильных транспортных средствах, проведен анализ их использования и применения. Приведены сравнительные мощностные и массовые характеристики дизельных и газотурбинных силовых агрегатов, показаны положительные и отрицательные стороны их использования. Определена эффективность внедрения газотурбинных двигателей на тракторах различных тяговых классов сельскохозяйственного назначения и разработана новая кинематическая схема энергетической установки мобильного транспортного средства. Проведен анализ и установлено, что в России газотурбинная сельскохозяйственная техника никогда не производилась, а проводившиеся отдельные экспериментальные исследования носили не системный характер и были прекращены по независимым от результата причинам. Целью работы является разработка инновационной кинематической схемы с электроприводом и силовым блоком на базе газотурбинного двигателя для мобильного транспортного средства сельскохозяйственного назначения, используя последние достижения науки и техники в части развития газотурбинных технологий. Установлено, что масса энергетические характеристики газотурбинных установок значительно лучше дизельных, значительно ниже уровень вибрации, большой крутящий момент силовой установки на низких оборотах, более простое управление трактором, что открывает широкую перспективу для их использования на мобильных транспортных средствах сельскохозяйственного назначения. Проведенные экспериментальные исследования по обработке 1 га площади по экономической эффективности показали неоспоримое преимущество практически лабораторного образца трактора с газотурбинным двигателем, относительно такого же отработанного и много лет выпускаемого трактора с дизельным двигателем, выраженное, несмотря на несколько больший расход топлива, в использовании более дешевого керосина.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, дизельный двигатель, мобильное транспортное средство, генератор, трактор с газотурбинным двигателем.

Для цитирования: Гусаров В.А., Годжаев З.А. Сравнительные характеристики дизельных и газотурбинных энергоустановок для мобильных тягово-транспортных средств // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 3 (45). С. 7–13. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-7-13.

Введение

Современные отечественные самодвижущиеся транспортные средства – автомобили и тракторы – оборудованы дизельным или бензиновым двигателем внутреннего сгорания, механической или автоматической коробкой переключения передач, а также ведущими и ведомыми мостами. Такая кинематическая схема, проверенная временем, неплохо себя зарекомендовала. Такие транспортные средства нашли широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, на транспорте и в армии. Механическая передача крутящего момента от двигателя на ведущие колеса происходит через несколько ступеней шестеренчатых пар, расположенных в коробке переключения передач, дифференциале, бортовых конечных передачах, что суще-

ственно увеличивает материалоемкость, стоимость и снижает надежность всей конструкции и КПД передачи.

Цель исследования

Разработать новую кинематическую схему энергетической установки мобильного транспортного средства сельскохозяйственного назначения с более высокой надежностью, более продолжительным ресурсом и сниженными масса-габаритными параметрами силовой установки.

Материалы и методы

Транспортные средства повышенной мощности – железнодорожные тепловозы серии ТЭ109, 2ТЭ10, карьерные самосвалы БЕЛАЗ-75600, Caterpillar-797, Terex 33-19 Titan и трак-

торы ДЭТ-400 – имеют электромеханическую трансмиссию, которая существенно облегчает управление этими машинами, они имеют меньший шум и вибрацию [1, 2, 3, 4]. Такие трансмиссии применяются на тяговых машинах, которым необходима большая масса.

Существуют транспортные троллейбусы, работающие в карьерах и шахтах и исключают загазованность и образование дыма. Их применение целесообразно там, где имеются сложности с выветриванием загрязняющих веществ в воздухе и где имеется большая разница между затратами на дизельное топливо и стоимостью электроэнергии [5, 6].

Анализируя существующие кинематические схемы и электроприводы вышеперечисленных транспортных средств, установили, что энергетические установки, состоящие из дизельного двигателя и электрогенератора, составляют 20–30 % от общей массы транспортного средства.

Описанные выше транспортные средства оснащены дизельными двигателями, основными недостатками которых являются большой вес двигателя, повышенная вибрация и что особенно критично, невысокая частота вращения.

На дизельных тракторах, комбайнах и других самоходных машинах сельскохозяйственного назначения применяются дизельные

двигатели с частотой вращения 1,5–2,5 тысячи мин⁻¹, в соответствии с этими оборотами выбирается силовой электрогенератор. Анализ технических характеристик дизельных двигателей показывает, что на 1 кВт мощности дизельного двигателя приходится 3,5–5 кг его массы. В таблице 1 приведена удельная масса некоторых современных двигателей.

Эти дизельные агрегаты являются приводами для силовых синхронных и асинхронных генераторов, применяемых на тракторах, частота вращения которых составляет 1500–2300 мин⁻¹. Из-за низкой частоты вращения масса таких генераторов сопоставимо с массой двигателя. В таблице 2 приведена удельная масса силовых генераторов.

В сельскохозяйственном производстве эти машины из-за своих высоких масса-габаритных параметров, отражающихся на удельном давлении на грунт, не находят применения. Ставится задача разработать сельскохозяйственные мобильные транспортные средства энергетическими силовыми модулями с низкой собственной массой.

Предлагается кинематическая схема мобильного транспортного средства сельскохозяйственного назначения с электромеханической трансмиссией, которая предполагает использование в качестве двигателя в отличие от традиционных бензиновых и дизельных

Таблица 1

Удельная масса дизельных двигателей, кг/кВт

Транспортное средство	Двигатель			
	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	Мощность, кВт	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
ДЭТ 250	1500	246	1000	4,06
John Deere 6068DF158	1600	139	522	3,75
Caterpillar CAT D9R	1500	447	1500	3,35
Case 1650L WT	1700	116	612	5,27

Таблица 2

Удельная масса силовых генераторов, кг/кВт

Электрогенератор	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	Электрическая мощность, кВт	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
Синхронный генератор Leroy-Somer LSA 44.3 L10 /Франция/	1500	120	433	3,6
Синхронный генератор Linz Electric PRO28S D/4 /Италия/	1500	200	741,5	3,7
Синхронный генератор ИГ-250 /Россия/	1500	250	1120	4,48
STAMFORD PI144E9311 /Англия/	1500	27,5	133,7	4,8

двигателей газотурбинный силовой модуль с электрогенератором.

В начале 90-х годов на мировом рынке энергооборудования появились микротурбины [7]. Микротурбинные установки (МГТУ) работают по тому же принципу, что и стационарные газотурбинные агрегаты, но имеют меньшие размеры и, соответственно, мощность (до 400 кВт) [8]. Также важной чертой этих установок является компактность конструкции [9].

По своей конструкции, микротурбины бывают осевые и радиальные. Осевые турбины применяются там, где некритичны габаритные размеры. Радиальные турбины имеют меньшие размеры при той же мощности.

Основным отличием радиальных турбин от осевых являются следующие аспекты:

1. Турбокомпрессор такого типа особенно пригоден для малых газотурбинных двигателей, так как путем конструктивного соединения турбины с крыльчаткой компрессора с таким же наружным диаметром можно сделать конструкцию более компактной [10, 11].

2. Ротор радиальной центробежной турбины в отличие от ротора осевой турбины, состоящего из диска и отдельных лопаток, может быть изготовлен более дешевым способом из поковки или путем точного литья [10].

3. Радиальная турбина малых размеров теоретически может быть даже более эффективной, чем соответствующая осевая турбина вследствие значительно меньшего влияния числа Рейнольдса на ее характеристики и, следовательно, масштабы [10].

4. Радиальная турбина имеет более высокую прочность и надежность в работе по сравнению с осевой турбиной [10].

5. Лопатки радиальной турбины практически нечувствительны к действию малых твердых частиц, оказавшихся в газообразных продуктах сгорания, в то время как попадание твердых частиц на лопатки осевой турбины может вызвать серьезную эрозию лопаток [10].

6. Радиальная турбина имеет более высокие перепады давлений в ступени, чем турбина осевого типа. Для перепадов давлений в ступени, порядка 3 или 4, может быть применена 2-х или 3-х ступенчатая радиальная турбина [10].

7. Радиальная турбина с регулируемым сопловыми лопатками может сохранять свой расчетный (максимальный) КПД в относительно широком диапазоне мощностей и, таким образом, иметь значительно лучшие характери-

стики при частичных нагрузках, чем турбина осевого типа [10].

8. Как и осевая, турбина радиального типа, используемая как свободная или силовая, имеет такие же характеристики максимального крутящего момента при запуске на малой частоте вращения [10].

Газотурбинный двигатель имеет большую частоту вращения, чем дизельный или бензиновый двигатель, что существенно снижает его масса-габаритные характеристики. Турбина ТС-21, в состав которой входит газотурбинный двигатель и электрогенератор, при общем весе 50 кг обеспечивает электрическую мощность 59 кВт, при частоте вращения ротора 50500 мин^{-1} [12]. На рис. 1 представлен внешний вид ТС-21.



Рис. 1. Газотурбинный электрогенератор ТС-21

Более мощный газотурбинный электрогенератор ВК-150 мощностью 86 кВт имеет массу 46,5 кг.

Газотурбинный электрогенератор ГТДЭ-117, представленный на рис. 2, мощностью 50 кВт, имеет массу 42 кг [13].

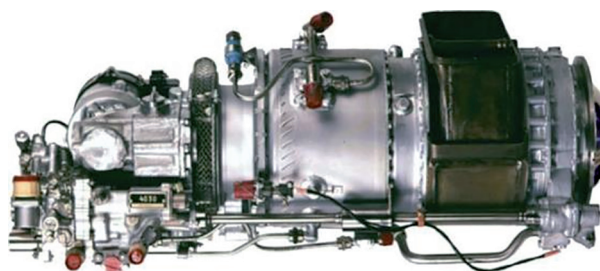


Рис. 2. Газотурбинный электрогенератор ГТДЭ-117

В таблице 3 приведена удельная масса газотурбинных силовых энергоустановок, применяемых в качестве резервных источников электроснабжения.

При сравнении масс дизельных электрогенераторов с газотурбинными, примерно равной мощности, наблюдается следующее соотношение, представленное в таблице 4 [14].

Таблица 3

Удельная масса, кг/кВт, газотурбинных силовых установок

Энергоустановка	Электрическая мощность, кВт	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт
Газотурбинный электрогенератор ТС-21	50	59	1,18
Газотурбинный электрогенератор ВК-150	86	46,5	0,54
Газотурбинный электрогенератор ГТДЭ-117	50	42	0,84

Таблица 4

Соотношение массы дизельэлектрических и газотурбинных электрогенераторов

Дизельэлектрические электрогенераторы (ДЭГ)	Мощн. кВт	Масса, кг	Газотурбинный электрогенератор (ГТЭГ)	Мощн. кВт	Масса, кг	Соотношение масс ДЭГ к ГТЭГ
КОНЛЕР-SDMO J66K (Франция)	48	1022	ТС-21	50	59	17,3:1
GMPen GMC66 (Италия)	48	970	ГТДЭ-117	50	42	23,1:1
Гранд Моторс АД-60С-Т400-ЯМЗ (Россия)	83	1800	ВК-150	86	46,5	38,7:1

Результаты и обсуждения

Кинематическая схема мобильных транспортных средств с такими энергетическими модулями предполагает использование силовых электродвигателей, масса и размеры которых зависят от частоты вращения. Для снижения массы и геометрических параметров между электродвигателем с частотой вращения 6000 мин^{-1} и ведущим колесом размещается понижающий редуктор. В зависимости от мощности электродвигателя и коэффициента редукции определяется крутящий момент на ведущем колесе.

Блок-схема предлагаемой кинематической схемы представлена на рис. 3.

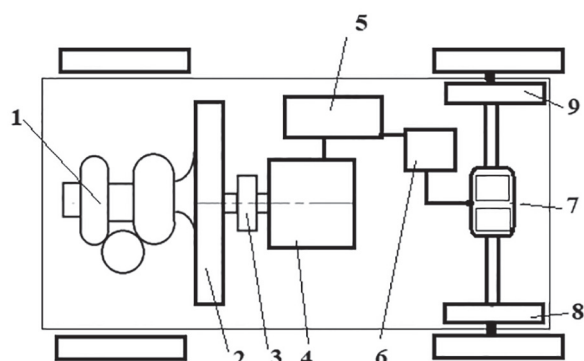


Рис. 3. Электромеханическая схема транспортного средства

На рис. 3 представлено: 1 – газотурбинный двигатель; 2 – свободная силовая турбина; 3 –

радиатор охлаждения вала генератора; 4 – синхронный генератор; 5 – аккумуляторная станция; 6 – блок управления; 7 – двухроторный асинхронный двигатель; 8 – редуктор левого борта; 9 – редуктор правого борта.

Применение высокоскоростных агрегатов, газотурбинной энергоустановки и электродвигателя, позволяет снизить масса-габаритные параметры силового оборудования примерно в четыре раза. Снижение массы силового оборудования обеспечивает снижение массы рамы, мостов, колес и т. д., так как прочностные расчеты этого оборудования производятся с учетом массы устанавливаемого оборудования. Снижение общей массы трактора влечет снижение расхода топлива на 10–15 % и уменьшение давления на грунт на 35 – 40 %.

Эти транспортные средства должны выполнять соответствующие сельскохозяйственные технологические операции в связи с тем, что нарушается традиционное соотношение мощности и массы трактора, так как тяговое усилие на крюке трактора напрямую зависит от массы трактора. А это, соответственно, требует разработки новой линейки навесного и пахотного оборудования.

Однако в истории развития газотурбинного тракторостроения имеются примеры экспериментальных исследований, проведенных в конце восьмидесятых годов прошлого века в нашей стране. На Кировском заводе в Ленинграде был изготовлен газотурбинный трактор

на базе К-700 (ГТТ) типа ЛСХИ-ЛКЗ, «Турбо», масса которого на 1,35 т. меньше аналога [15]. Сравнительные испытания проводились в ВНИИПТИМЭСХ, переименованный в 2010 г. в СКНИИМЭСХ. Результаты испытаний приведены в таблице 5 [16].

Выводы

Проведенные сравнительные испытания тракторов с дизельным и газотурбинным двигателями показали высокую перспективу применения на тракторах сельскохозяйственного назначения газотурбинных двигателей.

Следует учесть, что при проведении сравнительных испытаний на тракторе К-701 работал отработанный, испытанный временем и доведенный практически до совершенства дизельный двигатель ЯМЗ-260, когда на тракторе К-701«Турбо» работал экспериментальный, практически лабораторный образец, не адаптированный к механической трансмиссии. Экономическая эффективность трактора К-701«Турбо»+ПН-9-35, относительно трактора К-701+ПН-9-35 по себестоимости обработки 1 га площади по расходу топлива за счет использования керосина превысила на 30 %.

Литература

1. Ahmad, Mubarik; Brimmers, Jens; Brecher, Christian. Influence of long-wave deviations on the qua-

si-static and dynamic excitation behavior at higher speeds. Applied acoustics. 2020. N 8. Т. 16. UNSP 107307.

- De Pinto, Stefano; Camocardi, Pablo; Chatzikomis, Christoforos; On the Comparison of 2-and 4-Wheel-Drive. Electric. Vehicle Layouts with Central Motors and Single- and 2-Speed Transmission Systems. Energies. 2020. N 6. Т. 13. Выпуск: 13 UNSP 3328.
- Schroeders, Simon; Maier, Clemens C.; Ebner, Wolfgang; Two-degree-of-freedom MIMO control for hydraulic servo-systems with switching properties. Control engineering practice. N 2. Т. 95 UNSP 104246.
- Lion A.; Johlitz M. A mechanical model to describe the vibroacoustic behaviour of elastomeric engine mounts for electric vehicles. Mechanical systems and signal processing. Т 144. UNSP 106874.
- Хазин М.Л., Штыков С.О. Карьерный электрифицированный транспорт // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 11–18.
- Галкин В. И., Шешко Е. Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №1. С. 485–507.
- Никитин О. Микротурбины в борьбе за потребителя // Экологические системы № 11, сентябрь 2012.
- Фаворский О.Н. Газотурбинные установки в энергетике – важнейший путь экономии топливно-энергетических ресурсов России // Двигатель. 2011. № 4.

Таблица 5

Эксплуатационно-технологические показатели пахотных агрегатов на базе тракторов К-701 и К-701 «Турбо»

Показатель	Состав агрегата	
	К-701 + ПН-9-35	К-701 «Турбо» + ПН-9-35
Установочная глубина вспашки, см	23 – 25	23 – 25
Рабочая скорость, км/ч	12,9	14,7
Передача КП	III-4	III-4
Средняя ширина захвата, м	3,22	3,20
Время основной работы, ч	2,75	3,75
Коэффициент рабочих ходов	0,54	0,65
Объем выполненной работы, га	10,79	18,70
Производительность, га, за 1 ч: основного времени	3,92	4,98
технологического времени (без учета времени на устранение отказов МТА)	2,94	3,25
сменного времени (без учета регламентируемых затрат)	2,20	2,59
Расход топлива (за технологическое время), кг: на 1 га вспаханной площади	18,5	20,3
за 1 ч технологического времени (без учета времени на устранение отказов плуга)	54,1	65,9
Себестоимость обработки 1 га площади по расходу топлива, руб./га	1733	1334
Применяемое топлива	дизельное	керосин

9. Панькив В. Когенерация: как это работает. Обзор рынка // Сети и Бизнес. 2010. № 4 (53).
 10. Гусаров В.А., Кулагин Я.В. Газотурбинные технологии для автономного электроснабжения // Газотурбинные технологии. 2012. № 7 (108).
 11. Гусаров В.А., Годжаев З.А. Разработка газотурбинных установок малой мощности для использования на промышленных предприятиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. Т. 47 № 6. С. 27–33.
 12. <https://sites.google.com/view/yak-nebo/dvigateli/ts-21-gazo-turbostarter>
 13. <https://klimov.ru/production/aircraft/apu/>
 14. https://www.grandmotors.ru/cummins_c66d5e.php
 15. Шкрабак В.С., Вьюгин А.М., Калужный И.Г. и др. Газотурбинный трактор: результаты исследований // Техника в сельском хозяйстве. 1979. № 9. С. 57–58.
 16. Агеев Л.Е., Шкрабак В.С., Моргулис-Якушев В.Ю. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отдие, 1986. 415 с.
- Preferences**
1. Ahmad, Mubarik; Brimmers, Jens; Brecher, Christian. Influence of long-wave deviations on the quasi-static and dynamic excitation behavior at higher speeds. *Applied acoustics*. 2020. No 8. Vol. 16. UNSP 107307.
 2. De Pinto, Stefano; Camocardi, Pablo; Chatzikomis, Christoforos; On the Comparison of 2-and 4-Wheel-Drive. Electric. Vehicle Layouts with Central Motors and Single- and 2-Speed Transmission Systems. *ENERGIES*. 2020. No 6. Vol. 13. Vypusk: 13 UNSP 3328.
 3. Schroeders, Simon; Maier, Clemens C.; Ebner, Wolfgang; Two-degree-of-freedom MIMO control for hydraulic servo-systems with switching properties. *Control engineering practice*. 2020. No 2. Vol. 95. UNSP 104246.
 4. Lion A.; Jahlitz M. A mechanical model to describe the vibroacoustic behaviour of elastomeric engine mounts for electric vehicles. *Mechanical systems and signal processing*. 2020. No 10. Vol. 144. UNSP 106874.
 5. Khazin M.L., Shtykov S.O. Career electrified transport. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2018. Vol. 16. No 1, pp. 11–18. (in Russ.).
 6. Galkin V.I., Sheshko Ye.Ye. Problems of improving transport systems in the mining industry of Russia. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2011. No 1, pp. 485–507. (in Russ.).
 7. Nikitin O. Microturbines in the fight for the consumer. *Ekologicheskiye sistemy*. No 11, sentyabr' 2012. (in Russ.).
 8. Favorskiy O.N. Gas turbine plants in the power industry are the most important way to save fuel and energy resources in Russia. *Dvigatel'*. 2011. No 4.
 9. Pan'kiv V. Cogeneration: how it works. *Seti i Biznes*. 2010. No 4 (53). (in Russ.).
 10. Gusarov V.A., Kulagin Ya.V. Gas turbine technologies for autonomous power supply. *Gazoturbinnyye tekhnologii*. 2012. No 7(108). (in Russ.).
 11. Gusarov V.A., Godzhayev Z.A. Development of low-power gas turbine units for use in industrial enterprises. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*. 2018. Vol. 47. No 6, pp. 27–33. (in Russ.).
 12. URL: <https://sitesgoogle.com/view/yak-nebo/dvigateli/ts-21-gazo-turbostarter>
 13. URL: <https://klimov.ru/production/aircraft/apu/>
 14. URL: https://www.grandmotors.ru/cummins_c66d5e.php
 15. Shkrabak V.S., V'yugin A.M., Kalyuzhnyy I.G. i dr. Gas turbine tractor: research results. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 1979. No 9, pp. 57–58. (in Russ.).
 16. Ageyev L.E., Shkrabak V.S., Morgulis-Yakushev V.Yu. L.: Agropromizdat. Leningr. otd-e Publ., 1986. 415 p.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINES AND GAS TURBINE POWER PLANTS FOR MOBILE VEHICLES

DSc in Engineering **V.A. Gusarov**, DSc in Engineering **Z.A. Godzhaev**
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
cosinys50@mail.ru, fic51@mail.ru

The paper considers the use of diesel-electric power plants on mobile vehicles, analyzes their use and application. Comparative power and mass characteristics of diesel and gas turbine power units are given; the positive and negative aspects of their use are shown. The efficiency of the introduction of gas turbine engines on tractors of various traction classes for agricultural purposes has been determined and a new kinematic diagram of the power plant of a mobile vehicle has been developed. An analysis was carried out and it was established that gas turbine agricultural equipment was never produced in Russia. There were carried out the individual experimental studies of not of a systemic nature, which were terminated for reasons independent of the result. The aim of the work is to develop an innovative kinematic diagram with an electric drive and a power unit based on a gas turbine engine for a mobile agricultural vehicle, using the latest advances in science and technology in terms of the development of gas turbine technologies. It has been established that the mass-energy characteristics of gas turbine plants are much better than diesel ones: the level of vibration is significantly lower, the torque of the power plant at low speeds is higher, the operation of the tractor is simpler. All these open up wide prospects for their use on mobile agricultural vehicles. Experimental studies on the processing of 1 hectare of area in terms of economic efficiency have shown the indisputable advantage of an almost laboratory model of a tractor with a gas turbine engine, relative to the same tractor with a diesel engine, which has been produced for many years, expressed, despite a slightly higher fuel consumption, in the use of cheaper kerosene.

Keywords: gas turbine engine, diesel engine, mobile vehicle, generator, tractor with gas turbine engine.

Cite as: Gusarov V.A., Godzhaev Z.A. Comparative characteristics of diesel engines and gas turbine power plants for mobile vehicles. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2020. No 3 (45), pp. 7–13 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-7-13.