

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ

© Раков В.А.,
Литвинов В.И.



Вячеслав Александрович Раков

Вологодский государственный университет
Российская Федерация, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15
E-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4725-5839; ResearcherID: M-9939-2016



Владимир Игоревич Литвинов

Вологодская государственная молочнохозяйственная
академия имени Н.В. Верещагина
Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, д. 1
E-mail: lit.vinov@mail.ru

В статье показана методика определения необходимой мощности двигателя комбинированной энергетической установки трактора по заданным условиям движения. Актуальность метода – это определение наиболее приемлемых характеристик для энергетической установки, которые позволят уменьшить стоимость ее дорогих элементов. Методика основана на тягово-мощностных расчетах, а также на первоначальных данных о режиме движения трактора. В качестве расчетной модели использовался алгоритм вычисления необходимых характеристик КЭУ. Как пример авторы привели расчеты параметров КЭУ параллельной схемы для трактора массой 4,5 т во время пахотных работ с номинальным тяговым усилием 1150 кгс. Приведенные параметры сравнимы с трактором МТЗ-82 с комбинированной энергетической установкой и навесным оборудованием. По мере расчетов в энергетической установке разбираются схемы доставки энергии от двигателя внутреннего сгорания к ведущим колесам: передача энергии механическим путем через коробку передач; передача энергии через генератор, накопитель энергии и электрический двигатель. Выводы показали, что для выбранной машины мощность двигателя внутреннего сгорания должна составлять 51,6 кВт, а тяговый накопитель энергии должен запасать 13 кДж электроэнергии. Расход дизельного топлива во время наивысшей производительности составил 11,3 л/ч. Даже с учетом коэффициента запаса мощность двигателя внутреннего сгорания вместе с комбинированной энергетической установкой будет меньше примерно на 12% по сравнению с дизельным трактором. Представленный метод позволяет выполнять многовариантное моделирование в разных комбинациях и соотношениях между мощностью ДВС, запасаемой накопителем энергии, расходом топлива и стоимостью энергоустановки.

Двигатель, развиваемая мощность, расход топлива, крутящий момент, цикл движения, тяговое усилие.

В ближайшее время тракторы будут оставаться одним из решающих органов производства в ряде отраслей, жизненно необходимых для человечества. Можно вспомнить лишь сельское хозяйство, лесозаготовки и строительство, чтобы доказать это мнение. В любом случае на данный момент не предложено никакой реальной альтернативы этим машинам.

Можно также напомнить, что общее количество тракторов, используемых в мире, занимает третье место после автотранспорта и велосипедов. Поэтому совершенствование устройства сельскохозяйственных машин, нацеленное на увеличение их потребительских свойств, продолжается с использованием новых возможностей науки и техники. Несомненно, импульсом для этого является необходимость улучшения технологий производства тракторов [1–5].

С учетом повышения конкурентных условий к сельскохозяйственным машинам разработчики пытаются улучшить их технические характеристики. Основные расходы при использовании сельскохозяйственной техники, например тракторов, связаны с топливом, смазочными материалами и запасными деталями. При постоянной эксплуатации на обслуживании комплекса трактором МТЗ-82 при работе по привозу кормов, а также для привода раздатчика кормов в течение рабочего времени может быть потрачено до 20 л топлива. За год эксплуатации расходы только лишь на дизельное топливо будут составлять более 300 тыс. руб. Кроме этого, для того чтобы трактор находился в рабочем состоянии, нужно будет приобрести запчасти и другие расходные материалы еще на несколько сотен тыс. руб. [6].

Для сельскохозяйственной машины и трактора главным потребительским свойством необходимо считать его производительность. Сезонный характер и особенности почвенно-климатических

зон России придают этому свойству особую значимость, учитывая рекомендуемые сроки проведения таких работ, как закрытие влаги весной, весенний сев и вспашка зяби после уборки ранних колосовых.

Двигатель, применяемый в тракторе МТЗ-82, развивает мощность 58,8 кВт, при этом значительную часть смены он работает на холостом ходу и чаще всего является недогруженным. При максимальных нагрузках, наоборот, приходится создавать достаточный запас вырабатываемой двигателем мощности, что приводит к увеличению расхода топлива.

Целью исследования является комбинированная энергетическая установка (КЭУ) параллельного типа (mild hybrid), позволяющая уменьшить мощность двигателя внутреннего сгорания за счет его рационального нагружения.

Материалы, методы и объекты исследования

Схема КЭУ трактора параллельного вида, как и большинства транспорта, имеет трансмиссию с изменяемым передаточным числом, а электрическая машина стоит параллельно ей. Когда двигатель внутреннего сгорания (ДВС) загружен не до конца, электрическая машина в режиме генератора вырабатывает дополнительный запас энергии в приемнике-накопителе. При полной же нагрузке электрическая машина образует дополнительный крутящий момент, начиная потреблять запасенную в накопителе энергию. Эта же схема работы используется при запуске ДВС [7–13].

Одна из самых распространенных ошибок, допускаемых конструкторами при создании большинства машин с КЭУ, – использование двигателя большого рабочего объема, который имеет большой запас по мощности и высокий расход топлива на холостом ходу, а также чаще всего ока-

зывается не полностью загруженным, что приводит к большим экономическим потерям техники. Если определять среднюю потребляемую мощность в заданных условиях использования, то можно правильно находить характеристики двигателя, работающего в составе с КЭУ трактора. Для этого применяется тягово-мощностной расчет по указанному типу движения [14].

Главным рабочим параметром трактора является выдаваемое им тяговое усилие. Согласно ГОСТу 25836-83, при проведении приемочной проверки определяются номинальная и максимальная тяговые силы при допустимых уровнях буксования. Так, согласно техническим условиям, наибольшее тяговое усилие трактора МТЗ-82 при движении со скоростью 2,5 км/ч (на первой передаче) будет 1400 кгс. При неизменных нагрузках (например, во время вспашки почвы) применяется понятие «номинальное тяговое усилие», которое для данной машины окажется в пределах 1150 кгс при движении 10 км/ч (на пятой передаче без ходоуменьшителя). Двигатель Д-240 трактора МТЗ-82 является четырехтактным четырехцилиндровым и имеет максимальную мощность 58,8 кВт (80 л. с.) при 2200 об./мин и максимальный крутящий момент 290 Нм при 1400 об./мин.

В качестве примера возьмем режим движения трактора с наивысшим тяговым усилием во время вспашки почвы.

Начальным вычислением в данном случае будет цикл движения техники при вспашке, который можно показать в виде графика зависимости тягового усилия на рабочем органе и скорости движения от времени ($V = f(t)$; $T = f(t)$). Так как стандартный испытательный цикл движения для тракторов отсутствует, авторами была взята характеристика изменения тягового усилия на рабочем органе и скорости при вспашивании почвы (рис. 1).

Первичными условиями для вычисления необходимых параметров КЭУ трактора могут быть: масса трактора (m), коэффициент сопротивления качению (f_a); коэффициент учета вращающихся масс (k_m). В связи с тем что скорость трактора мала, коэффициент обтекаемости воздуха в расчетах можно не принимать во внимание.

Задействуя данный ездовой цикл движения трактора во время вспашивания почвы и методику вычислений параметров энергетической установки, можно найти оптимальную схему КЭУ, необходимую мощность двигателя внутреннего сгорания, накопителя энергии, а также мощность электрического двигателя.

При расчете модели был принят алгоритм вычисления оптимальных параметров КЭУ, изложенный в исследованиях, проведенных ранее [13–16]. Необходимыми данными для расчетов были приняты

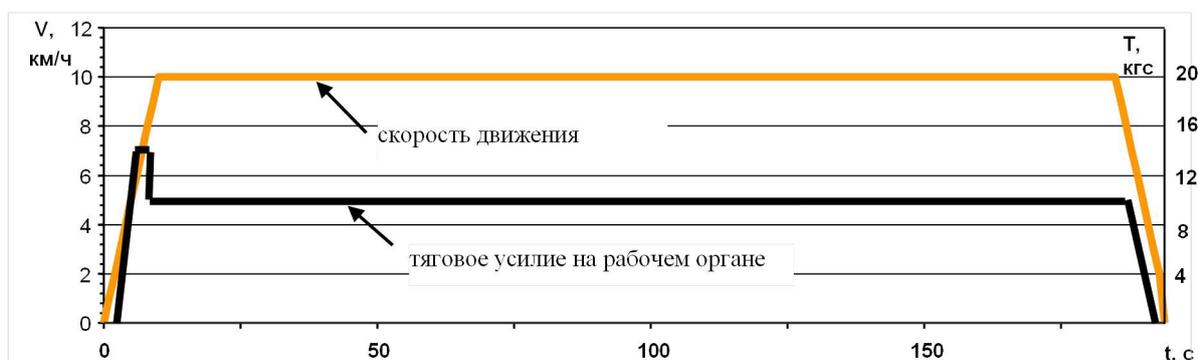


Рис. 1. Принятый ездовой цикл для исследования движения трактора

цикл движения, характеристики коробки передач, электродвигателя, генератора, накопителя электроэнергии и силового преобразователя.

Ниже представлены алгоритм и результаты вычислений параметров КЭУ параллельной схемы для трактора массой 4,5 т при вспашке почвы с номинальным тяговым усилием 1150 кгс.

Если проанализировать выражение мощностного баланса трактора (1), то можно определить силы сопротивления движению в каждой i -й точке цикла движения: P_{ki} – сила сопротивления качению; $P_{ии}$ – сила инерции; $P_{пн}$ – сила сопротивления подъему; $P_{даi}$ – сила сопротивления дополнительных агрегатов. Если сложить вышеупомянутые силы, то их сумма будет равняться силе тяги на ведущих колесах трактора $P_{Тн}$. Такое выражение действия сил мощностного баланса на трактор примет вид:

$$P_{Тн} = P_{ki} + P_{ии} + P_{пн} + P_{даi}, \text{ кВт} \quad (1)$$

На рис. 2 показаны изменения мощности сил, действующих на трактор при движении по заданному циклу.

Результаты исследования

Средняя тяговая мощность на всем участке движения $P_{ср.пол}$ фактически будет

являться средней мощностью энергоустановки (без учета потерь на сопротивление трению в коробке перемены передач) и примет вид:

$$P_{ср} = \frac{\sum_i^n P_{срi}}{n}, \text{ кВт} \quad \sum N_T > 0 \quad (2)$$

При этом мощность двигателя можно определить из суммы мощности, передаваемой по прямой механической передаче, и мощности, передаваемой через накопитель энергии, с учетом потерь при передаче энергии:

$$P_{двс} = \frac{P_{ср.пол}}{K \times \eta_{п}} \times \eta_{р} = \frac{P_{пр.ср} + P_{нэ.ср}}{K \times \eta_{п}} \times \eta_{р}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где:

$P_{двс}$ – необходимая мощность ДВС с учетом потерь на приводе, кВт;

K – коэффициент эффективного использования ДВС (определен экспериментальным путем [17]);

$\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия привода;

$P_{пр.ср}$ – средняя мощность за время испытаний, передаваемая по механической передаче от двигателя на ведущие колеса;

$P_{нэ.ср}$ – средняя мощность за время испытаний, проходящая через накопитель энергии.

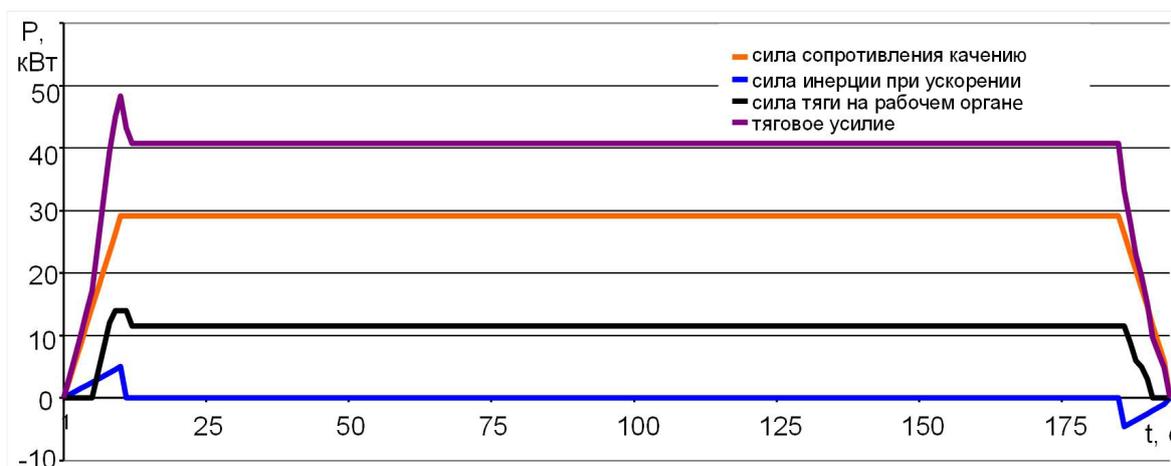


Рис. 2. График изменения суммарной мощности сопротивления качению на ведущих колесах трактора при вспашивании почвы: $P_{Тн} = f(t)$

Общие потери в цепочке передачи энергии показаны на *рис. 3а*.

Энергия от двигателя внутреннего сгорания частично будет передаваться на ведущие колеса по прямой цепочке (*рис. 3б*) и частично через тяговый накопитель энергии (ТНЭ). При этом энергия, проходящая через ТНЭ, рассчитывается как средняя мощность при движении на тех участках, на которых мощность на ведущие колеса за цикл выше средних значений [18].

С учетом особенностей параллельной схемы при нахождении необходим расчет средней потребляемой мощности $N_{\text{ср.потр. КЭУ}}$ во время работы, но только в тех временных промежутках, где задействован двигатель внутреннего сгорания ($N_{\text{ввых}} > 0$).

При расчете средней потребляемой мощности ДВС $N_{\text{ср.пол}}$ в различных частях учитывают среднюю мощность, проходящую по прямой механической передаче, – $N_{\text{пр.ср}}$ и среднюю мощность электрической передачи – $N_{\text{эл.ср}}$:

$$N_{\text{ср.пол}} = \frac{\sum_1^n N_i}{n}, \text{ кВт} \quad (\Sigma \text{ если } N_i > 0) \quad (4)$$

Потребление мощности от двигателя внутреннего сгорания по прямой схеме с учетом потерь в механической передаче находится по формуле:

$$N_1 = \frac{N_{\text{ср.пол}}}{K \times \eta_{\text{тр}}}, \text{ кВт} \quad (5)$$

Потребляемая мощность при передаче от электродвигателя по параллельной схеме с учетом потерь в электрической передаче находится по формуле:

$$N_{\text{эл.ср}} = \frac{\sum_1^n (N_i - N_{\text{ср.пол}})}{n}, \text{ кВт} \quad (\Sigma \text{ если } N_i - N_{\text{ср.пол}} > 0), \quad (6)$$

где:

n – количество значений, удовлетворяющих условию $N_i > 0$ (двигатель внутреннего сгорания при этом задействован).

В линии электропривода электрическая энергия при зарядке идет от генератора (электрической машины) к тяговому накопителю энергии и от него обратно к электрической машине, работающей в режиме электродвигателя. Электроэнергия в параллельной схеме проходит через преобразователь два раза, только после этого передается на электродвигатель и трансмиссию (*рис. 3в*). Если учитывать коэффициент полезного действия привода ($\eta_{\text{п}}$) и коэффициент использования двигателя (K), то мощность будет равна:

$$N_2 = \frac{N_{\text{эл.ср}}}{K \times \eta_{\text{п}}}, \text{ кВт} \quad (7)$$

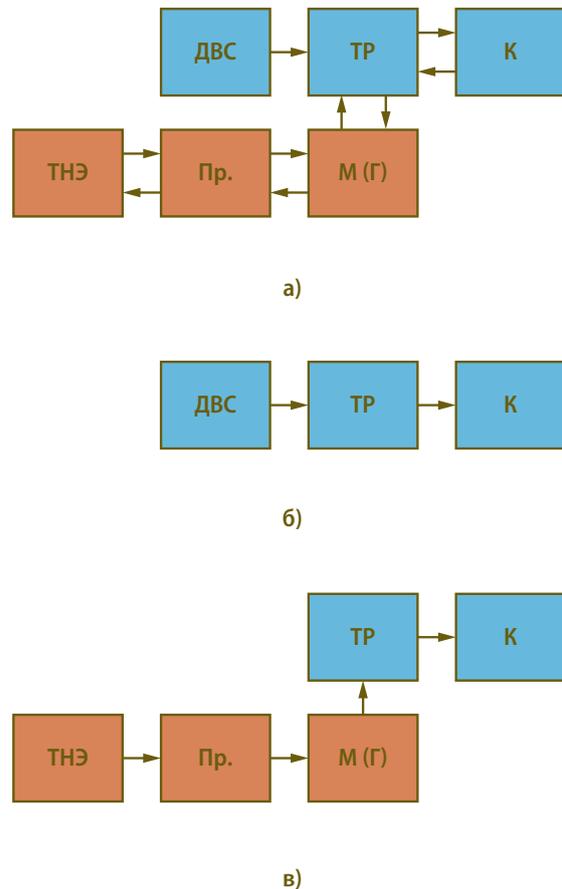


Рис. 3. Блок-схема потерь при параллельном способе привода:
а) общая цепочка потерь;
б) в механической передаче;
в) в электрической передаче

Обозначения: ТР – трансмиссия; К – ведущие колеса; Пр. – инвертор; М (Г) – электродвигатель (генератор).

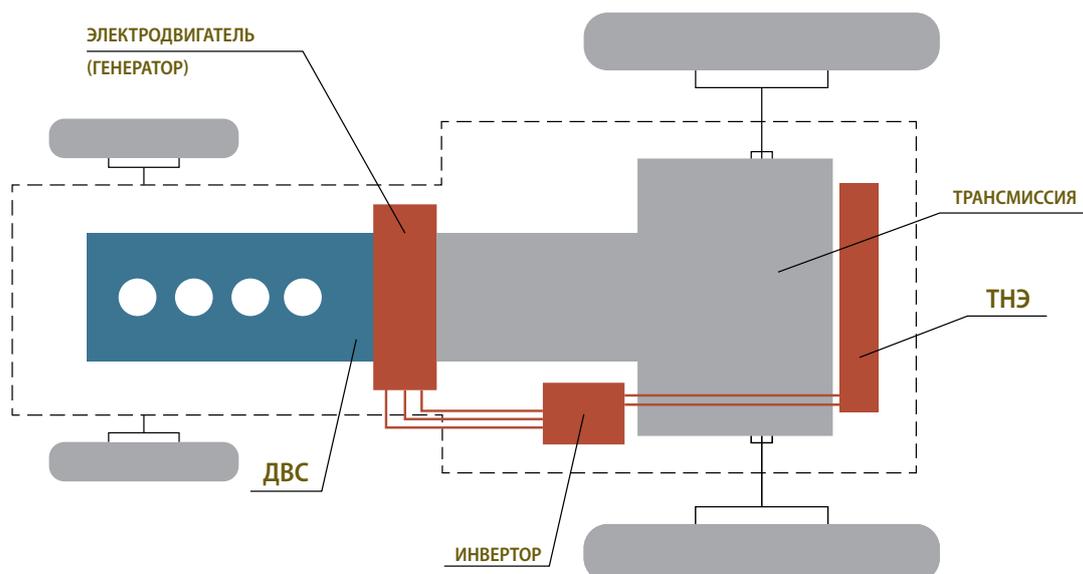


Рис. 4. Возможная схема комбинированной энергетической установки параллельного типа трактора

На рис. 4 показан один из возможных вариантов компоновки трактора с использованием типовой схемы КЭУ параллельного типа.

Работа КЭУ параллельного типа основана на применении механической передачи энергии через ступенчатую трансмиссию. Электрический двигатель только один, поэтому устанавливается параллельно трансмиссии (между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач) и используется только при разгонах и промежуточных режимах при переходе на другой рабочий режим нагрузки. Излишки энергии двигателя во время движения используются генератором для заряда накопителя. Таким образом, приведенная схема может применяться для частичного выравнивания пиков нагрузки ДВС, в начале движения с места и при подключении мощных рабочих органов, например, таких как раздатчик кормов [10].

Выводы

Из расчетов видно, что для сельскохозяйственной машины массой 4,5 т при работе по вспашке почвы с номинальным тяговым усилием 1150 кгс мощность двигателя внутреннего сгорания гибридной энер-

гетической установки должна составлять 51,6 кВт, номинальная мощность электродвигателя – 30,5 кВт, расход дизельного топлива при наибольшей производительности – 11,3 л/ч, характеристики ТНЭ должны обеспечивать запас энергии 13 кДж. Даже с учетом коэффициента запаса мощность двигателя внутреннего сгорания в составе КЭУ ниже примерно на 12%.

Следует отметить, что трактор с данной КЭУ будет обладать такими же характеристиками, что и МТЗ-82, но при частичных нагрузочных режимах он окажется более экономичным.

Преимущества от расчетов заключаются в нахождении нужной мощности двигателя внутреннего сгорания в совокупности с комбинированной энергетической установкой, когда все составляющие привода будут обладать характеристиками, обеспечивающими наименьшую стоимость машины и ее минимальный расход топлива. Кроме этого, возможны различные варианты моделирования в разных соотношениях и комбинациях между мощностью двигателя внутреннего сгорания, запасаемой накопителем энергией, расходом топлива и стоимостью энергоустановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров И.К., Несговоров Е.В., Раков В.А. Адаптивные трансмиссии – путь к созданию экономичных машинных агрегатов и транспортных средств // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 1. С. 25–27.
2. Раков В.А., Литвинов В.И. Определение необходимой мощности двигателя комбинированной энергетической установки трактора // Изв. С.-Петерб. агр. ун-та. 2019. № 3 (56). С. 145–151.
3. Раков В.А. Повышение энергетической эффективности гибридных двигателей с параллельной схемой расположения элементов // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. С. 118–123.
4. Смирнов А.В., Раков В.А. Определение необходимой мощности ДВС гибридных силовых установок транспортных средств // Вестн. машиностроения. 2010. № 4. С. 32–35.
5. К вопросу о технологическом развитии сельскохозяйственного производства / Ф.А. Киприянов [и др.] // Состояние перспектив развития научного обеспечения сельскохозяйственного производства на Севере: сб. тр. Сыктывкар, 2007. С. 190–196.
6. Александров И.К., Раков В.А. Определение мощности, потребляемой транспортным средством при неустановившихся режимах работы // Автомобильная промышленность. 2013. № 5. С. 9–11.
7. Александров И.К., Несговоров Е.В., Раков В.А. Тяговый расчет транспортных средств с адаптивным приводным двигателем // Вестн. машиностроения. 2010. № 2. С. 16–18.
8. Раков В.А. Расчет мощности ДВС гибридной силовой установки параллельного типа // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: мат-лы Междунар. науч.-технич. конф. Вологда: ВоГУ, 2016. С. 129–134.
9. Шипилевский Г.Б. Проблемы развития конструкции тракторов // Изв. МГТУ «МАМИ». 2014. № 2 (20). С. 78–82.
10. Новиков Г.В., Шипилевский Г.Б. Структура и динамика управления электрическим приводом тракторов // Изв. МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). С. 254–262.
11. Трактор с электромеханической трансмиссией / С.Н. Флоренцев [и др.] // Тракторы и с.-х. машины. 2010. № 7.
12. Новиков Г.В. Теория и принципы автоматического регулирования многодвигательных бесступенчатых трансмиссий // Тракторы и с.-х. машины. 2005. № 4. С. 20–26.
13. Шипилевский Г.Б. Особенности управления индивидуальным приводом ведущих колес машины при асимметричной тяговой нагрузке // Изв. МГТУ «МАМИ». 2010. № 2.
14. О концепции тягового электропривода сельскохозяйственного трактора / П.А. Амельченко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 1 (34). С. 14–21.
15. Изосимов Д.В., Гнездов Н.С., Журавлев С.Е. Проектирование асинхронных тяговых электродвигателей и синтез векторного управления тяговыми приводами // Электронные компоненты. 2010. № 11.
16. Пинский Ф.И. Электроустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами // Мобильная техника. 2004. № 2.
17. Кулаков А.Т., Макушин А.А. Разработка алтайского трактора в варианте с электромеханической трансмиссией // Тракторы и с.-х. машины. 2013. № 2.
18. Геча В.Я. Математическая модель системы приводных асинхронных двигателей ведущих колес транспортного средства // Электричество. 2012. № 5.

Сведения об авторах

Вячеслав Александрович Раков – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет». Российская Федерация, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Владимир Игоревич Литвинов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, д. 1; e-mail: lit.vinov@mail.ru

CALCULATION OF ENGINE POWER OF AGRICULTURAL MACHINE HYBRID POWER PLANT

Rakov V.A., Litvinov V.I.

The article presents the method of determining the necessary engine power of a combined power plant of the tractor according to the specified driving conditions. The relevance of the method consists in the identification of the most appropriate characteristics for a power plant, which will reduce the cost of expensive items. The method is based on the traction and power calculations and the initial data on the tractor's movement mode. The algorithm for calculation of the required characteristics of the combined power plant was used as the estimated model. As an example, the authors demonstrate the calculations of a combined power plant parameters of parallel circuits for a tractor weighing 4.5 t during the ploughing work with force exerted rating of 1150 kgF. These parameters are comparable to tractor MT3-82 with a combined power plant and attachments equipment. Along with the calculations the schemes of delivery of energy from the internal combustion engine to the drive wheels are developed in the power plant, energy transmission by mechanical means through a gearbox; energy transmission through the generator, the energy storage and electric motor. The findings showed that for the selected machine the power of the internal combustion engine should be at 51.6 kW, and a traction energy storage needs to store 13 kJ of electricity. Consumption of diesel fuel while the highest performance made up 11,3 l/h. Even given the safety factor, the power of the internal combustion engine with a combined power installation will be less by about 12% compared to diesel tractor. The presented method allows to perform a multivariate modelling in different combinations and relations between the power of the engine, energy reserved by the storage, fuel consumption and the cost of the power plant.

Engine, developed power, fuel consumption, torque, motion cycle, moving force.

Information about the authors

Vyacheslav A. Rakov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “The Vologda State University”. 15, Lenina Street, Vologda, 160000, Russian Federation; e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru

Vladimir I. Litvinov – Candidate of Sciences (Agriculture), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 1, Emel’yanova Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: lit.vinov@mail.ru