

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ПЕРЕДАЧИ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Асп. КЛЮЧНИКОВ А. В.

Белорусский национальный технический университет

В тракторостроении все большее распространение получают трансмиссии, обеспечивающие бесступенчатое регулирование скорости движения тягового или транспортного средства, которое может быть получено различными конструктивными решениями.

Здесь будет рассмотрена электромеханическая силовая передача применительно к сельскохозяйственному трактору в части согласования ее параметров с характеристикой дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Известны потенциальные возможности использования бесступенчатого регулирования в трансмиссиях сельскохозяйственных тракторов:

- обеспечение широкого диапазона агротехнических скоростей агрегатов;
- повышение производительности тракторных агрегатов путем оптимизации технологических и действительных скоростей;
- снижение расхода топлива за счет обеспечения работы дизеля в экономичном режиме;
- уменьшение динамических нагрузок при изменении скорости;
- снижение уровня вредных выбросов дизеля за счет работы в ограниченном частотном диапазоне с минимальным расходом топлива;
- уменьшение физических нагрузок оператора при управлении трактором;
- приспособленность системы для автоматизации управления;
- увеличение ресурса дизеля и ходовой системы из-за исключения передачи динамических нагрузок от ходовой системы на дизель и неравномерности крутящего момента дизеля на узлы ходовой системы. Это возможно только при отсутствии жесткой связи между двигателем и ходовой системой, например при полнопоточной электромеханической передаче, где

дизель соединен только с генератором, а тяговый электродвигатель – с ходовой системой;

- повышение тягового КПД за счет меньшего буксования ведущих колес из-за отсутствия переменных нагрузок со стороны дизеля.

Для обеспечения всех или части перечисленных положительных моментов необходимо в первую очередь правильное согласование параметров электромашин и их системы управления с параметрами дизеля и его системой управления.

В последнее время предъявляются повышенные требования как к экологическим показателям, так и снижению расхода топлива дизельных двигателей, что требует применения новых устройств впрыска дизельного топлива. Механическое регулирование для дизельных систем впрыска вытесняется электронным. Кроме того, электронной обработкой данных можно охватить много влияющих величин при совместном регулировании параметров дизеля и параметров тягового средства. Это позволит иметь общую систему «двигатель – трансмиссия» [1].

Для согласования совместной работы дизеля и электромашин первоначально необходимо определить наиболее экономичные режимы работы дизеля во всем скоростном диапазоне как на внешней характеристике, так и на частичных скоростных и нагрузочных режимах [2].

Определяются зависимости параметров дизеля от частоты вращения коленчатого вала: мощности $P = f(n)$, крутящего момента $M = f(n)$, удельного расхода топлива $q = f(n)$ при полной подаче топлива (внешняя характеристика), а также при скоростных режимах, соответствующих максимальному крутящему моменту и максимальной мощности (рис. 1).

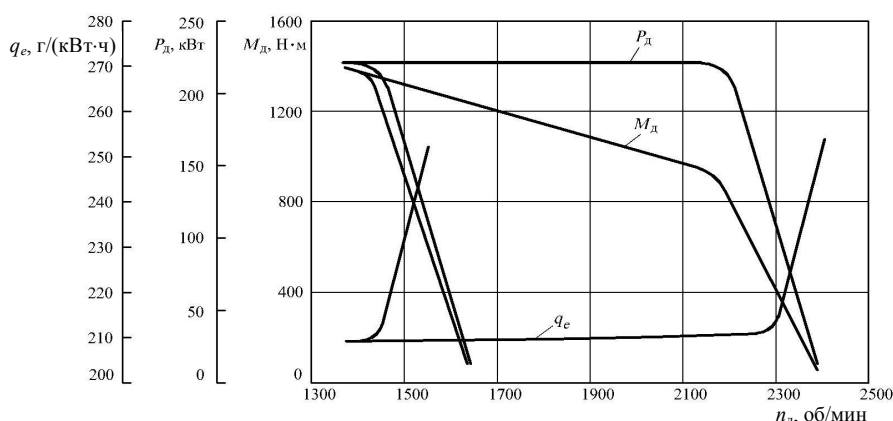


Рис. 1. Типовая характеристика двигателя фирмы Detroit Diesel серии 40E-8,7LTA мощностью 220 кВт (300 л. с.)

Кроме этого, определяются показатели двигателя при фиксированных мощностях с регистрацией удельных расходов топлива (рис. 2). Из этих зависимостей видно, что с уменьшением скоростного режима удельный расход топлива снижается при любой фиксированной мощности.

Имея характеристику дизеля и генератора, можно приступить к их согласованию для обеспечения оптимальной работы. По генератору необходимо иметь зависимости мощности $P_{гг}$, крутящего момента $M_{гг}$ и КПД от частоты вращения ротора генератора. При выборе генератора следует обратить внимание на то, чтобы его частота вращения при максимальной мощности и максимальном крутящем моменте приблизительно совпадала с аналогичными параметрами дизеля. Необходимо иметь в виду, что при согласовании рассматриваются предельные значения параметров как дизеля, так и электромашин, а значения параметров работы на частичных скоростных и нагрузочных режимах расположены в области, ограниченной кривыми

предельных значений, и могут рассматриваться аналогично для каждого отдельного случая.

Итак, в координатах мощности и крутящего момента от частоты вращения строятся зависимости двигателя $M_d = f(n)$; $P_d = f(n)$ и генератора $M_g = f(n)$; $P_g = f(n)$ (рис. 3). При этом в зоне A рабочей характеристики дизеля должны располагаться максимальная мощность и максимальный момент генератора. Если совмещение не обеспечивается, между дизелем и генератором устанавливается согласующий редуктор. Зона A является рабочей зоной дизель-генераторной установки в составе силовой передачи трактора. Кроме этого, выделяется наиболее экономичный участок A , совместной характеристики исходя из минимального удельного расхода топлива.

На следующем этапе производится согласование параметров тяговых электродвигателей (ТД) с тяговой характеристикой трактора, которое зависит от выбранной схемы силовой передачи.

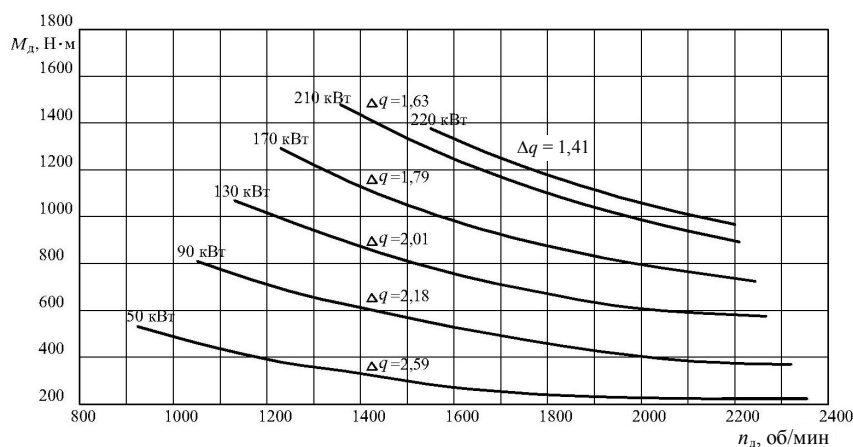


Рис. 2. Характеристики двигателя Detroit Diesel серии 40E-8,7LTA мощностью 220 кВт (300 л. с.) при фиксированных мощностях

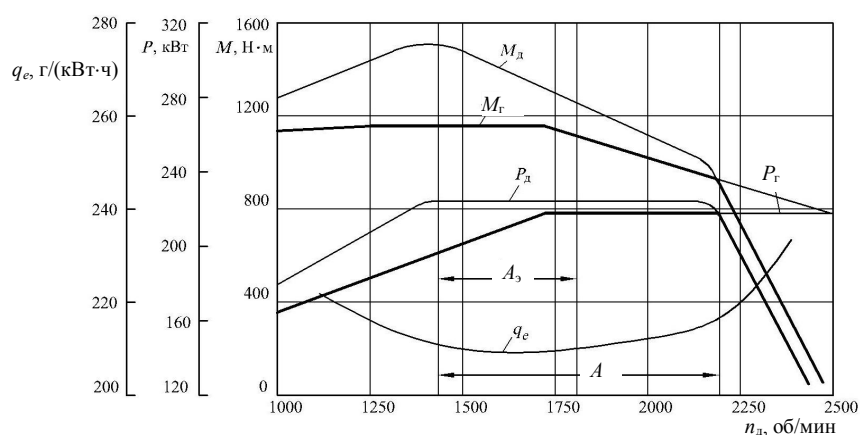


Рис. 3. График совместной работы двигателя внутреннего сгорания и генератора

Рассмотрим структурную схему электро-механической трансмиссии: дизель – генератор – электромотор – согласующий редуктор – ведущие мосты. Эта схема (рис. 4) позволяет сохранить действующие ведущие мосты, а согласование параметров электродвигателя и тяговой характеристики трактора осуществляется согласующим редуктором. Схема включает двигатель внутреннего сгорания 1, мотор-генератор 2, электрический ток которого передается на силовой преобразователь 3, соединенный с силовым преобразователем 4 тягового электродвигателя 5 шиной постоянного тока 6. Крутящий момент с ротора электродвигателя передается на согласующий редуктор 7, который соединен с задним ведущим мостом 8 и передним ведущим мостом 9. Редуктор 7 может быть одноступенчатым, многоступенчатым с переключением ступеней как на остановленном тракторе, так и в движении под нагрузкой в зависимости от требований, предъявляемых к тяговому средству. Он одновременно выполняет функцию распределения мощности по мостам. Данная схема имеет наиболее простой алгоритм управления, так как основные функции распределения мощности и крутящего момента между колесами осуществляются стандартными механическими дифференциальными механизмами, а подключение переднего ведущего моста производится теми же механизмами, что и в механической трансмиссии.

Для согласования параметров электродвигателя и трактора вначале строится потенциальная тяговая характеристика трактора, затем на нее накладывается характеристика тягового электродвигателя. Для построения потенциальной тяговой характеристики трактора необходимо знать номинальную мощность дизеля, эксплуатационную массу трактора, фон, на котором будет эксплуатироваться машина, тяго-

вый КПД трактора. Эти данные идентичны параметрам трактора-аналога, на который предполагается установить электро-механическую трансмиссию. При разработке нового трактора нужно эти параметры получить расчетным путем [3, 4].

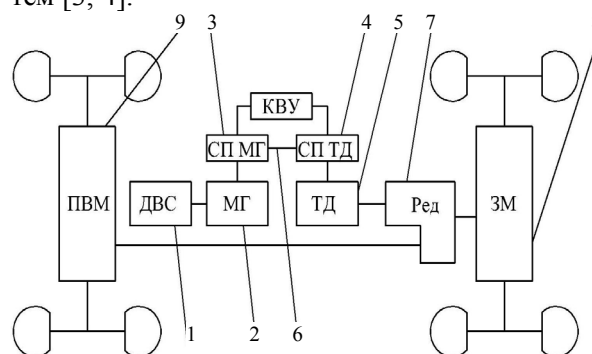


Рис. 4. Структурная схема трактора с последовательным расположением электромашин: ПВМ – передний ведущий мост; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; МГ – мотор-генератор; ТД – тяговый электродвигатель; Ред – согласующий редуктор; ЗМ – задний мост; СП МГ – силовой преобразователь мотора-генератора; СП ТД – силовой преобразователь тягового электродвигателя; КВУ – контроллер верхнего уровня

Первоначально выбирается максимальное тяговое усилие на крюке трактора. Оно может быть указано в техническом задании на трактор или определено в соответствии с ГОСТ 27021–86 на классификацию тракторов.

Эксплуатационная масса определяется по формуле

$$G_3 = \frac{P_{кр}}{\lambda\varphi - \alpha f},$$

где λ – коэффициент нагрузки ведущих колес, для колесных тракторов со всеми ведущими колесами (4×4) $\lambda = 1$; φ – коэффициент сцепления с почвой, для стерни колосовых нормальная влажности принимается $\varphi = 0,6-0,7$;

α – коэффициент, учитывающий внутренние потери в ходовой системе, для колесных тракторов $\alpha = 1$; f – коэффициент сопротивления перекачиванию колес, для стерни средней влажности принимается $f = 0,1$.

Тогда

$$G_3 = \frac{P_{кр}}{\varphi - f},$$

или, если принять $\varphi = 0,6$ и $f = 0,1$, получим

$$G_3 = \frac{P_{кр}}{0,5}.$$

Необходимая масса определяется исходя из обеспечения верхнего предела тягового усилия ($P_{кр\max}$) соответствующего класса

$$G_{3\max} = \frac{P_{кр\max}}{0,5}.$$

Номинальная мощность двигателя $P_{дн}$ определяется из условия номинального тягового усилия и заданной рабочей скорости и рассчитывается по формуле:

$$P_{дн} = \frac{(P_{кр} + fG_3)v}{270\eta_6\eta_M\eta_f} \quad \text{или} \quad P_{дн} = \frac{P_{кр}v}{270\eta_T},$$

где $\eta_T = \eta_6\eta_M\eta_f$ – тяговый КПД трактора; η_6 – КПД буксования; η_M – среднее значение КПД силовой передачи; η_f – КПД сопротивления перекачиванию; v – действительная скорость движения трактора.

Для предварительных расчетов можно принимать тяговый КПД, равным $\eta_T = 0,65$, а скорость движения $v = 9$ км/ч.

Определив эксплуатационную массу трактора, номинальную мощность дизеля (на маховике) и тяговый КПД, строим теоретическую потенциальную (предельную) тяговую характеристику. По оси ординат откладываем тяговое усилие (более удобно для расчетов откладывать крутящий момент на ведущих колесах) от касательной силы тяги ($M_k = (P_{кр} + fG_3)R_k$), по оси абсцисс – теоретическую скорость движения трактора (рис. 5). До определенной скорости тяговое усилие ограничивается сцеплением колес с почвой (линия 1), далее – мощностью дизеля (кривая 2).

Затем строим характеристику тягового электродвигателя или используем экспериментальную при наличии готового образца (рис. 6).

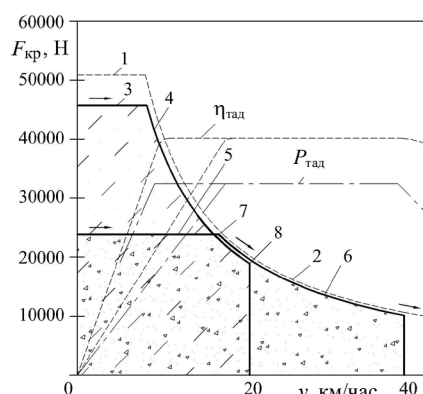


Рис. 5. Потенциальная тяговая характеристика трактора с тяговым электродвигателем

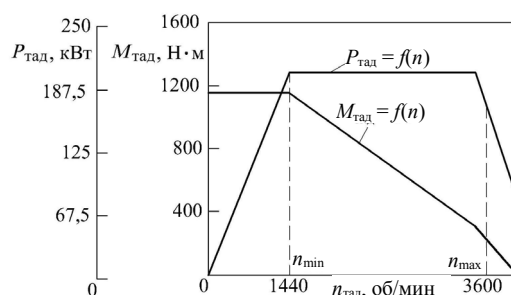


Рис. 6. Характеристика тягового электродвигателя

Для построения первого рабочего диапазона задаемся максимальной рабочей скоростью (она может быть определена техническим заданием). Имея максимальное значение частоты вращения ротора электродвигателя и величину частоты вращения ведущего колеса, определяем передаточное число согласующего редуктора. Накладывается трансформированная характеристика момента электродвигателя на тяговую характеристику трактора, т. е. все значения момента электродвигателя умножаются на передаточное число согласующих редукторов. Для наглядности по оси абсцисс откладывается частота вращения электромотора, соответствующая значениям скорости движения. Линия 3 определяет максимальное значение крутящего момента на ведущих колесах, а кривая 4 – значения крутящего момента при максимальной мощности электродвигателя. Зная максимальное значение транспортной скорости, аналогично строится характеристика для транспортного диапазона и накладывается на тяговую характеристику трактора (линия 5 и кривая 6). При этом значение момента в точке 7 должно быть больше, чем в точке 8, и скорость в точке 8 должна быть выше, чем в точке 7. Это даст возможность иметь запас скорости при переключении согласующего редуктора под на-

грузкой, т. е. при переходе с точки 7 к точке 8. При значении крутящего момента ниже значения момента в точке 7 целесообразно рассмотреть введение еще одного диапазона, так как не будет использована полная мощность на стыке диапазонов, а переключение диапазонов под нагрузкой будет проблематичным.

Когда на задний и передний мосты установлено по отдельному двигателю (рис. 7), согласование дизель-генераторной установки аналогично рассмотренному ранее. Согласование параметров каждого электродвигателя выполняется отдельно. Параметры тяговых электродвигателей выбираются исходя из нагрузок на передний и задний мосты для обеспечения тягового усилия по сцеплению колес с почвой. Учитывая, что при приложении тяговой нагрузки на крюке трактора происходит перераспределение массы трактора по осям и нагрузка на задний мост увеличивается по сравнению

с распределением массы в статическом состоянии, мощность тягового электродвигателя заднего моста выбирается с учетом догрузки. При классическом распределении массы трактора 60 % – на задний мост и 40 % – на передний мощность электродвигателя должна быть увеличена на 20 % по сравнению с расчетной в статическом состоянии. Это обеспечит работу трактора при сцепной массе на задний мост, равной 80 % от общей массы. Дальнейшая разгрузка переднего моста недопустима из условия обеспечения управляемости. Отсюда следует, что суммарная мощность тяговых электродвигателей по схеме рис. 7 должна быть больше, чем при последовательной схеме (рис. 5).

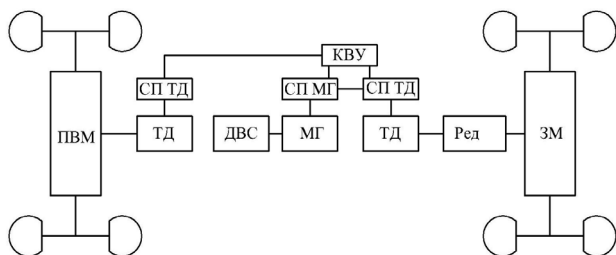


Рис. 7. Структурная схема трактора с приводом каждого моста отдельным электродвигателем (обозначения – на рис. 5)

На рис. 8 показаны графики согласования тяговых электродвигателей с тяговой характеристикой трактора при их раздельной установке для приводов переднего и заднего мостов. Линия 1 и кривая 2 ограничивают область предельной тяговой характеристики трактора, линия 3 и кривая 4 определяют зону возможных

значений тягово-скоростной характеристики в рабочем диапазоне скоростей. Линия 5 и кривая 6 ограничивают те же параметры транспортного диапазона. Отдельно для наглядности показана тягово-скоростная характеристика привода переднего моста для рабочего диапазона.

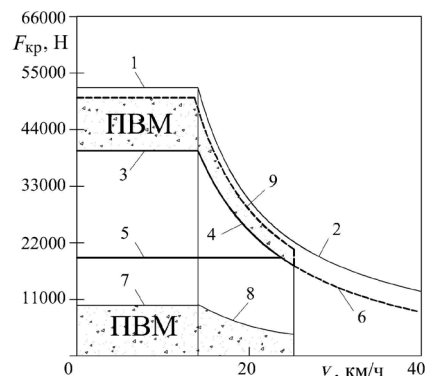


Рис. 8. Потенциальная тяговая характеристика трактора с двумя тяговыми электродвигателями

Суммируя параметры тягово-скоростных характеристик заднего и переднего мостов, получим общую огибающую кривую 9 тяговой характеристики двух электродвигателей.

ВЫВОД

Методика, описанная в статье, позволяет проводить выбор и согласование параметров электромашин тягового электропривода. Аналогичным образом следует выбирать параметры электромоторов и для других структурных схем с различным количеством тяговых электродвигателей при вариантах их установки в колесные редукторы. Суммарная мощность тяговых электродвигателей должна быть не меньше выходной мощности генератора, плюс мощность электродвигателей заднего моста должна быть увеличена на 20 % в сравнении с расчетной из условия нагрузки на мосты в статическом состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ксенович, И. П. Механические трансмиссии с бесступенчатым регулированием передаточных чисел между смежными ступенями коробки передач / И. П. Ксенович // Мобильная техника. – 2004. – № 1. – С. 21–29.
2. Ксенович, И. П. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники / И. П. Ксенович, Д. Б. Изосимов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 2. – С. 12–20.
3. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.
4. Ксенович, И. П. Проектирование универсально-пропашных тракторов / И. П. Ксенович, А. С. Солонский,