

Расчет и конструирование

УДК 62-83

DOI: 10.14529/engin180101

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.Д. Чернышев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В работе представлен расчет предельной механической характеристики тягового электродвигателя в составе электрической трансмиссии транспортного средства на примере типового автомобиля С класса. Указаны параметры необходимые для проведения расчета предельной механической характеристики. В статье приведены основные типы, используемых в настоящее время, электрических двигателей в качестве тяговых приводов, применяемых в электрических трансмиссиях: коллекторный двигатель постоянного тока, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, вентильный двигатель с самовозбуждением и вентильный двигатель с независимым возбуждением. Отмечены их главные достоинства и недостатки с точки зрения применения в качестве тягового электрического двигателя. В работе указаны силы, действующие на транспортное средство, на основе которых составлено уравнение тягового баланса. В результате, автор обосновывает то, что наилучшим вариантом предельной тяговой характеристики является равноплечая гипербола, которая соответствует характеристике постоянства мощности. Для построения предельной тяговой характеристики автор предлагает определять ключевые точки гиперболы, которые определяются в соответствии с эксплуатационными показателями транспортного средства. Рассмотрены ездовые циклы, используемые для измерения расхода топлива и запаса хода транспортного средства. Автор говорит о необходимости использования современного испытательного ездового цикла WLTC при расчете предельной механической характеристики тягового электродвигателя в составе электрической трансмиссии автомобиля для определения некоторых эксплуатационных параметров и основных механических характеристик тягового электрического двигателя.

Ключевые слова: транспортное средство, автомобиль, ездовой цикл, тяговый баланс, тяговый электрический двигатель, механическая характеристика.

Введение. При проектировании транспортного средства, не зависимо от типа привода, который приводит его в движение, всегда задаются определенными технико-эксплуатационными показателями. Задачей силовых агрегатов является обеспечение их выполнения. Основными эксплуатационными показателями, влияющими на выбор силовых агрегатов являются: полный вес транспортного средства G ; геометрические параметры транспортного средства; количество ведущих колес n ; номинальная скорость передвижения $V_{ном}$; номинальный преодолеваемый подъем $i_{ном}$; номинальная сила тяги $F_{ном}$; максимальная скорость передвижения $V_{макс}$; предельный преодолеваемый подъем $i_{пр}$; максимальная сила тяги $F_{макс}$; мощность энергетической установки P [1].

Необходимо учитывать, что данные эксплуатационные показатели должны обеспечиваться при допустимом нагреве силовых агрегатов тяговой системы, заданном удельном расходе энергии и энергетической эффективности.

Базируясь на эксплуатационных параметрах можно определить энергетические и силовые характеристики привода. Стоит оговориться, что в силу мобильности, любое автономное транспортное средство обладает определенными ограничениями по мощности. Так максимальная мощность двигателя внутреннего сгорания, генератора, аккумуляторной батареи ТС всегда определенная величина. По этой причине предельная тяговая характеристика ТС должна соответствовать постоянству мощности [2]. Реализуемая мощность ТС равна произведению силы тяги на

Расчет и конструирование

скорость, соответственно тяговая характеристика транспортного средства в идеальном случае соответствует закону равноплечей гиперболы [3]

Типы тяговых электрических двигателей. В качестве тягового двигателя в настоящее время применяются практически все типы электрических машин. Каждый из типов электрических машин обладает своими достоинствами и недостатками [4]. Поэтому нельзя с полной уверенностью говорить о том, что какая-либо электрическая машина является предпочтительной в качестве тягового электродвигателя в составе электрической трансмиссии. Можно выделить основные типы электрических машин применяемых в качестве тяговых двигателей:

– Коллекторный двигатель постоянного тока обладает многими достоинствами. У него высокая перегрузочная способность, широкий диапазон регулирования скорости за счет практически линейных регулировочных характеристик и возможности ослабления магнитного потока, простота и легкость управления. Но все достоинства перекрывает наличие механического щеточно-коллекторного узла, что негативно сказывается на надежности и долговечности [5–7].

– Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, при наличии современной системы управления, практически не уступает по регулирующим свойствам двигателю постоянного тока. По надежности, долговечности и массогабаритным показателям, асинхронный двигатель превосходит вышеупомянутый двигатель постоянного тока. Он обладает высокой технологичностью изготовления и низкой себестоимостью. Но несколько проигрывает по массогабаритным показателям вентильным индукторным двигателям и значительно проигрывает по массогабаритным показателям синхронным двигателям с постоянными магнитами. Кроме того, он имеет сложности с отводом тепла от ротора, в котором присутствуют достаточно большие потери [8, 9].

– Синхронный двигатель с постоянными магнитами обладает высоким КПД (свыше 90 %), высокой перегрузочной способностью, наилучшими массогабаритными показателями, широким диапазоном регулирования скорости и момента, жесткими механическими характеристиками. Существенным недостатком является наличие постоянным магнитом из редкоземельных материалов, они сложны в монтаже, хрупки и ограничивают перегрев машины. По этой причине данные машины относительно дорогие и сложные в производстве. Так же из-за низкой индуктивности статорных обмоток необходимо применять специальные технические решения [9–11].

– Вентильный реактивный двигатель с самовозбуждением очень прост, технологичен и дешев. ВИД обладает высокой перегрузочной способностью, широким диапазоном регулирования скорости и момента, высоким КПД в широком диапазоне изменения нагрузки и скорости, хорошими теплоотводными свойствами. Обладает тяговой механической характеристикой. К недостаткам следует отнести пульсации момента, обусловленные двойственной зубчатостью магнитной системы и необходимость специального силового преобразователя [12–14].

– Вентильный реактивный двигатель с независимым возбуждением обладает многими достоинствами ВИД с самовозбуждением, и обладает малыми пульсациями момента. К недостаткам следует отнести: необходимость специальных подшипников, исключаящих замыкание магнитного потока по ним, так же он довольно сложен в изготовлении из-за наличия обмотки возбуждения [15–17].

Важным преимуществом вентильного реактивного двигателя является то, что он обладает тяговой механической характеристикой, характеристикой постоянной мощности [18]. Несомненно, другие типы двигателей, например, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, синхронный двигатель на постоянных магнитах, могут реализовать заданную характеристику. Но при их применении скорее всего придется использовать электрическую машину завышенной мощности, как это сделано в автомобилях Tesla, где используется асинхронный двигатель. Это несомненно приведет к ухудшению массогабаритных показателей системы электропривода [19].

Тяговый расчет транспортного средства. В силу вышеизложенного одной из первоочередных задач, ставящихся перед проектировщиками, является определение мощности силовых агрегатов и предельной тяговой характеристики ТС. Для определения мощности энергетической установки рассматривают уравнение тягового баланса [20]. Тяговый баланс ТС можно представить выражением:

$$F_k = F_{\Sigma} = F_f + F_{\alpha} + F_w + F_J, \quad (1)$$

где F_f – сила сопротивления качению, F_{α} – сила сопротивления уклона, F_w – сила сопротивления воздушной среды, F_J – сила инерции.

$$F_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где m – масса АТС, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, f – коэффициент сопротивления качению, α – угол уклона дорожного полотна.

$$F_f = \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

$$F_w = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2, \quad (4)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха, S – площадь миделя.

$$F_J = m \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (5)$$

где dv/dt – ускорение АТС.

$$\text{Если принять, что} \quad \psi = f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha, \quad (6)$$

$$K_w = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S}{m \cdot g}, \quad (7)$$

$$K_J = \frac{1}{g}, \quad (8)$$

$$G = m \cdot g, \quad (9)$$

то уравнение тягового баланса примет вид

$$F_K = F_\Sigma = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_J \frac{dv}{dt}). \quad (10)$$

В таком случае уравнение мощностного баланса можно представить как

$$P_K = F_K \cdot v = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_J \frac{dv}{dt}) \cdot v, \quad (11)$$

где P_K – суммарная тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам.

На основе выражения (10) можно построить предельную тяговую характеристику. Для этого необходимо определить ключевые точки, которые задаются тремя характерными участками (рис. 1).

Отрезок АВ характеризует максимальное тяговое усилие. Точка В определяет граничную скорость максимального тягового усилия. Точка D определяет наибольшее тяговое усилие при максимальной скорости. Участок ВD определяется выбранной мощностью автономной установки. Точка С определяется максимальным тяговым усилием при номинальном угле подъема и номинальной скорости. Точка С предопределяет энергетическую эффективность системы. В этой точке система привода должна реализовать максимальный КПД. Поэтому номинальная скорость должна соответствовать скорости преобладающей при заданных эксплуатационных условиях.

Испытательные ездовые циклы. В настоящее время для всех ТС производится измерение расхода топлива (для транспортных средств с ДВС) или запаса хода (для электрических транспортных средств). Рассмотрим расчет тяговой характеристики электродвигателя электромобиля или автомобиля с комбинированной энергетической установкой. В данном случае обязательно нужно ориентироваться на испытательные ездовые циклы. Ездовые циклы формируются на основе статистического анализа езды [21]. Используя их можно определить основные параметры движения. Также можно проверить соответствие силовых и мощностных характеристик АТС реальным условиям.

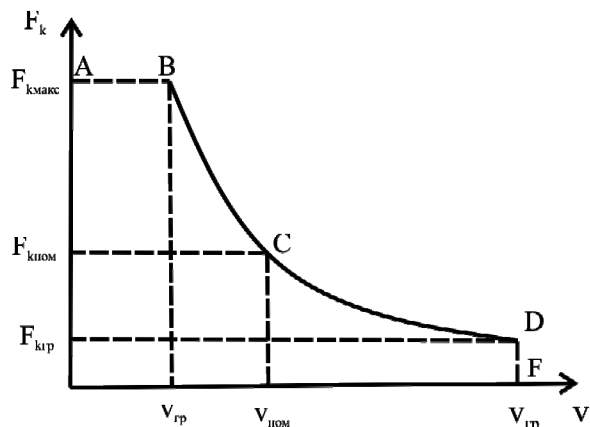


Рис. 1. Предельные тяговые характеристики транспортного средства

Расчет и конструирование

В европейской методике использовался ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle) (рис. 2, а). В США использовались два ездовых цикла: FTP-75 (Federal Test Procedure) (рис. 2, в) и HWFET (HighWay Fuel Economy Test) (рис. 2, г, табл. 1). В Японии используется методика JC08 (рис. 2, б). К сожалению, данные методики устарели и не соответствуют современному характеру движения. Это связано с тем, что количество транспортных средств на автомобильных дорогах продолжает неуклонно расти. А значит величины ускорения, средние и максимальные скорости, сама последовательность режимов движения изменяется. К тому же используемые ездовые циклы не предполагалось использовать для тестирования электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой [22].

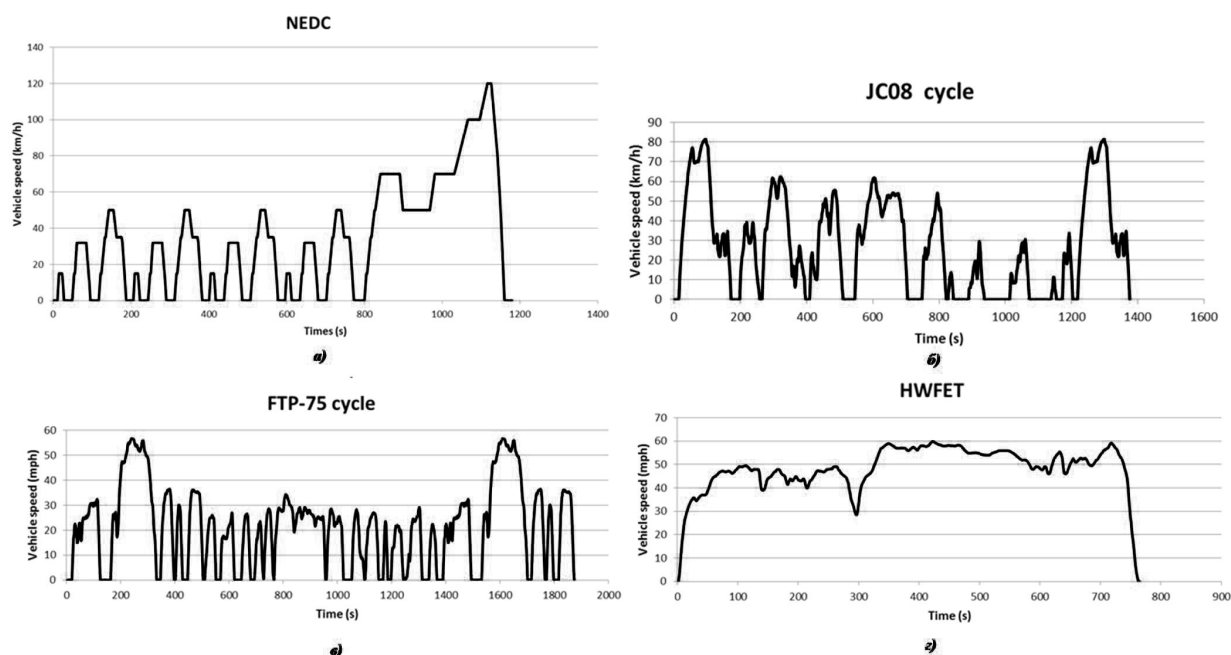


Рис. 2. Испытательные ездовые циклы: а – NEDC; б – JC08; в – FTP-75; г – HWFET

Таблица 1

Характеристики циклов

Название	Продолжительность, с	Протяженность, км	Средняя скорость, км/ч
NEDC	1180	11,023	33,6
FTP-75	1874	17,77	34,1
HWFET	765	16,45	77,7
JC08	1204	8,17	24,4
WLTC класс 1	1022	8,091	28,5
WLTC класс 2	1477	14,664	35,7
WLTC класс 3	1800	23,262	46,5

В прошлом году был представлен единый общемировой ездовой цикл WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles) (рис. 3), который имеет подразделение на три класса, в зависимости от мощности АТС:

- 1-й класс: не более 22 кВт/т;
- 2-й класс: свыше 22 кВт/т, но не более 34 кВт/т;
- 3-й класс: свыше 34 кВт/т.

WLTC наилучшим образом соответствует современным критериям движения транспорта как в городе, так и на трассе [23]. И так как данный цикл основан на основе статистического анализа действующего трафика, то можно утверждать, что при разработке АТС нужно основываться на испытательном ездовом цикле. Мощностные и тяговые характеристики транспортного средства должны позволять выполнить WLTC.

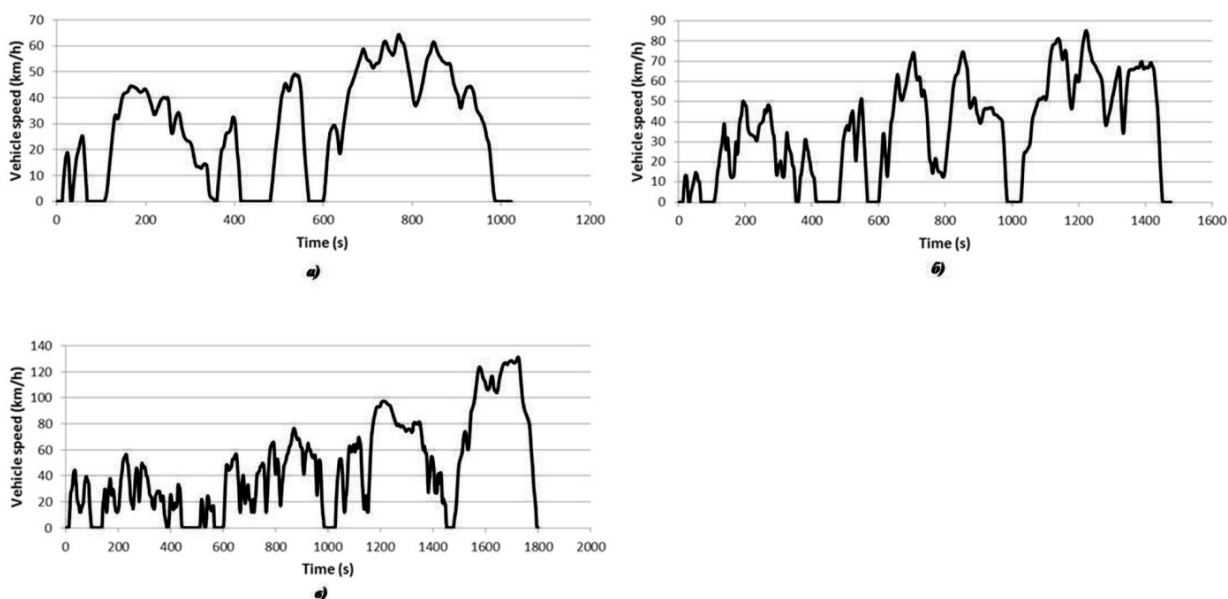


Рис. 3. Испытательный ездовой цикл WLTC:
а – цикл для 1 класса; б – цикл для 2 класса; в – цикл для 3 класса

Тяговый расчет транспортного средства, удовлетворяющего WLTC. Используя уравнения (10) и (11) определим тягу и мощность необходимые для реализации WLTC. Для этого зададимся характеристиками городского автомобиля, представленными в работе [24]. Характеристики автомобиля представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики АТС

Максимальная скорость автомобиля, м/с	44,4
Снаряженная масса автомобиля, кг	1020
Полная масса автомобиля, кг	1520
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,3
Коэффициент сопротивления качению	0,008
Площадь миделя, м ²	1,965
Радиус колеса, м	0,305
Высота центра масс, м	0,57
Максимальный угол подъема	30
Номинальный угол подъема	12
Мощность, кВт	40
Удельная мощность, кВт/т	39,2

Так как удельная мощность АТС больше 34 кВт/т, то это транспортное средство следует отнести к третьему классу – высокомошные АТС. Тяга необходимая для реализации WLTC представлена на рис. 4 и 6. Мощность необходимая для реализации WLTC представлена на рис. 5 и 7.

По выше приведенным диаграммам максимальная мощность для снаряженной массы АТС:

$$P_{\text{макс0}} = 29,8 \text{ кВт},$$

а для полной массы:

$$P_{\text{макс}} = 39,5 \text{ кВт}.$$

Авторы статей [2, 24] рассчитывают максимальную мощность по формуле:

$$P_{\text{макс}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{\text{макс}}^2) \cdot V_{\text{макс}}}{\eta_{\Sigma}}, \quad (12)$$

где f и K_w – коэффициенты сопротивления движению, η_{Σ} – суммарный КПД системы.

И соответственно тяговую характеристику АТС $F(v)$ определяют, как:

$$F(v) = \frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{v}. \quad (13)$$

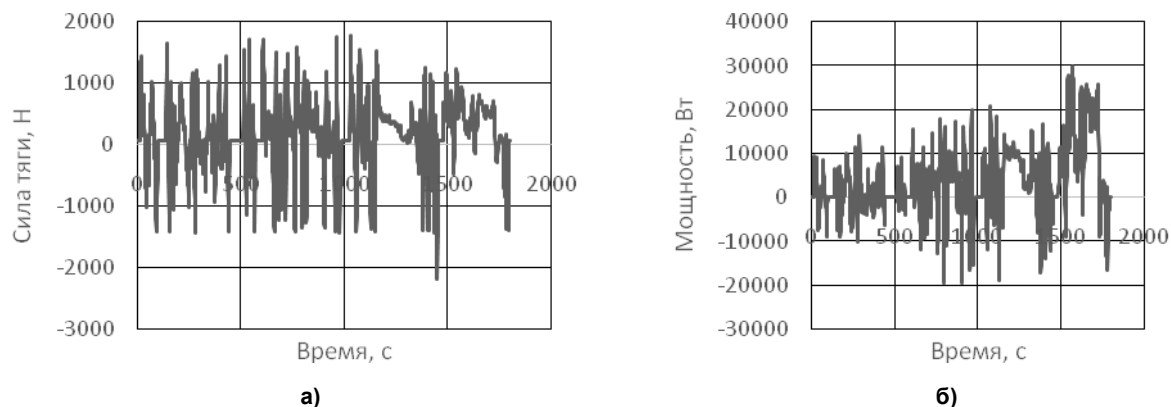


Рис. 4. Тяга, необходимая для реализации WLTC при снаряженной массе АТС (а); мощность, необходимая для реализации WLTC при снаряженной массе АТС (б)

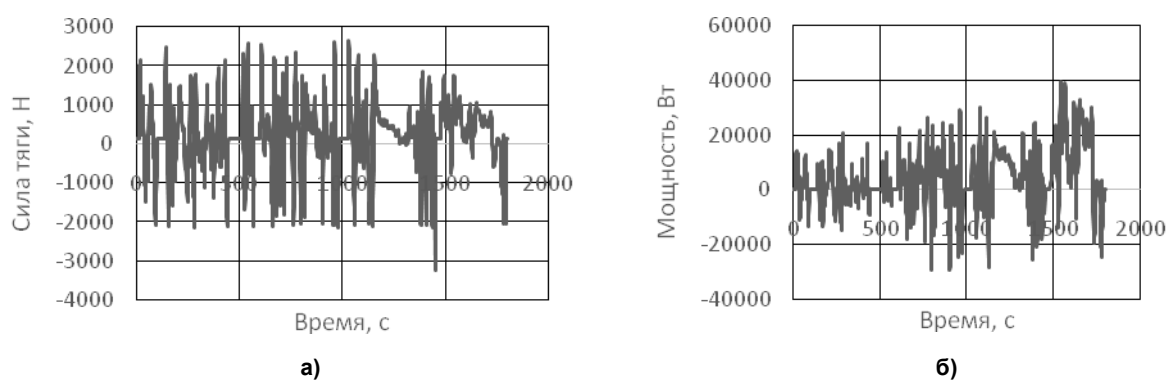


Рис. 5. Тяга, необходимая для реализации WLTC при полной массе АТС (а); мощность, необходимая для реализации WLTC при полной массе АТС (б)

Проверим адекватность данного подхода, вычислим максимальную мощность АТС по формуле (12). Для снаряженной массы:

$$P_{\text{макс0}} = 1020 \cdot 9,81 \cdot (0,008 + 2,37 \cdot 10^{-5} \cdot 44,4^2) \cdot 44,4 = 23720 \text{ Вт},$$

для полной массы:

$$P_{\text{макс}} = 1520 \cdot 9,81 \cdot (0,008 + 2,37 \cdot 10^{-5} \cdot 44,4^2) \cdot 44,4 = 35350 \text{ Вт}.$$

Как мы видим, несмотря на логичность выражения, мощность по (12) меньше мощности необходимой для реализации испытательного цикла больше. Это не говорит о неверности формулы. Это обусловлено искусственным ограничением максимальной скорости. Так без ограничения по скорости с заявленной мощностью АТС может достичь скорости при снаряженной массе:

$$V_{\text{макс0}} = 53,2 \text{ м/с},$$

при полной массе:

$$V_{\text{макс}} = 46 \text{ м/с}.$$

Определим ключевые точки тяговой характеристики для рассматриваемого АТС. Средняя скорость в соответствии с WLTC для 3-го класса составляет 13 м/с. Используя уравнения (10)–(13) так же можно найти номинальную скорость АТС. По условиям WLTC, движение осуществляется без какого-либо подъема дорожного покрытия. Тогда решив уравнение (14) найдем номинальную скорость вращения.

$$\frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{\text{ном}}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{\text{ном}}^2) \cdot V_{\text{ном}}}{\eta_{\Sigma}}. \quad (14)$$

Расчетная номинальная скорость для снаряженной массы:

$$V_{\text{ном}} = 15 \text{ м/с}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{\text{НОМ}} = 13 \text{ м/с}.$$

Номинальная скорость для полной массы соответствует средней скорости движения, продиктованной WLTC для 3-го класса, что говорит о правильности расчета. Но номинальная скорость должна рассчитываться для номинального угла подъема. Тогда средняя расчетная скорость для номинального угла подъема найдем из равенства (15).

$$\frac{P_{\text{макс}} \cdot \eta_{\Sigma}}{V_{\text{НОМ}}} = \frac{G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha + K_w \cdot V_{\text{НОМ}}^2) \cdot V_{\text{НОМ}}}{\eta_{\Sigma}}. \quad (15)$$

Расчетная номинальная скорость для снаряженной массы:

$$V_{\text{НОМ}} = 17,9 \text{ м/с}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{\text{НОМ}} = 12,3 \text{ м/с}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы практически равна средней скорости, продиктованной WLTC для 3-го класса. Далее будем рассматривать только полную массу, так это больше соответствует реалиям движения. Рассчитаем вторую координату для точки С (см. рис. 2), предельное тяговое усилие, для номинальной скорости в соответствии с (10):

$$F_{k\text{НОМ}} = 3275 \text{ Н}.$$

Так как максимальная скорость задана (см. табл. 2), то предельное тяговое усилие при максимальной скорости и соответственно при отсутствии какого-либо уклона дороги:

$$F_{k\text{гр}} = 817 \text{ Н}.$$

Аналогично нахождению координат точки С определим координаты точки D.

$$V_{\text{гр}} = 7,7 \text{ м/с};$$

$$F_{k\text{max}} = 5230 \text{ Н}.$$

Таким образом была получена предельная тяговая характеристика АТС.

Требуемая кратность максимальной скорости движения АТС составит:

$$K_v = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{НОМ}}}; \quad (16)$$

$$K_v = \frac{44,4}{13} = 3,4.$$

Требуемая кратность максимальной силы тяги АТС составит:

$$K_F = \frac{F_{k\text{max}}}{F_{k\text{НОМ}}}; \quad (17)$$

$$K_v = \frac{5230}{3275} = 1,4.$$

Совместим расчетную предельную тяговую характеристику и тяговую характеристику WLTC (рис. 6). Тяговая характеристика, реализуемая при WLTC, представлена точками, расчетная предельная тяговая характеристика представлена линией. Расчетная предельная тяговая характеристика охватывает тяговую характеристику WLTC. Таким образом, можно утверждать, что была рассчитана необходимая тяговая характеристика, которая позволяет полностью реализовать всемирный гармонизированный ездовой цикл для легкового автомобиля с некоторым запасом.

При создании электромобиля или автомобиля с комбинированной энергетической установкой, одной из задач является установление совокупности взаимосвязей между тяговым электроприводом и заданными тягово-динамическими характеристиками АТС. Чтоб привести полученную тяговую характеристику к механической характеристике без редукторного электрического привода, необходимо воспользоваться выражением:

$$M = F_k \cdot r_k, \quad (18)$$

где M – суммарный момент, развиваемый всеми ведущими колесами, r_k – радиус качения ведущего колеса.

Расчет и конструирование

Вращающий момент можно представить в соответствии с главным уравнением электропривода:

$$M = M_{\text{дин}} + M_c, \quad (19)$$

где M_c – статический момент, $M_{\text{дин}}$ – динамический момент.

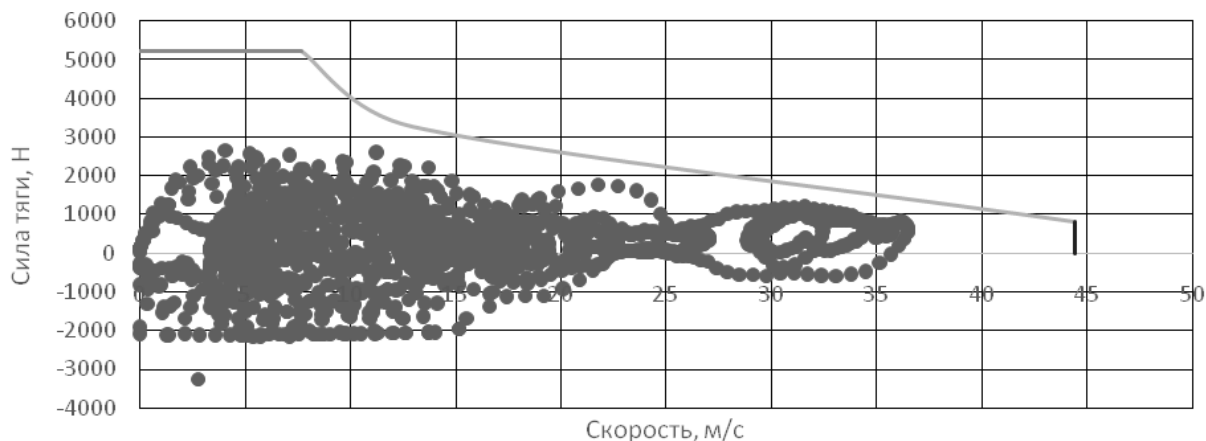


Рис. 6. Тяговая характеристика WLTC и расчетная предельная тяговая характеристика

Статический момент и динамический моменты можно представить, как (20), (22):

$$M_c = G \cdot \Psi \cdot r_k + 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot r_k^3 \cdot \omega^2, \quad (20)$$

где ω – угловая скорость электрического двигателя.

$$\omega = \frac{v}{r_k}. \quad (21)$$

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (22)$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции частей, совершающих поступательное и вращательное движение.

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n J_k + m \cdot r_k^2, \quad (23)$$

где J_k – момент инерции ведущего колеса.

В соответствии с (10), (11), (18)–(23) предельную механическую характеристику тягового привода представим выражением (24).

$$M = \frac{P_{\text{max}}}{\omega}. \quad (24)$$

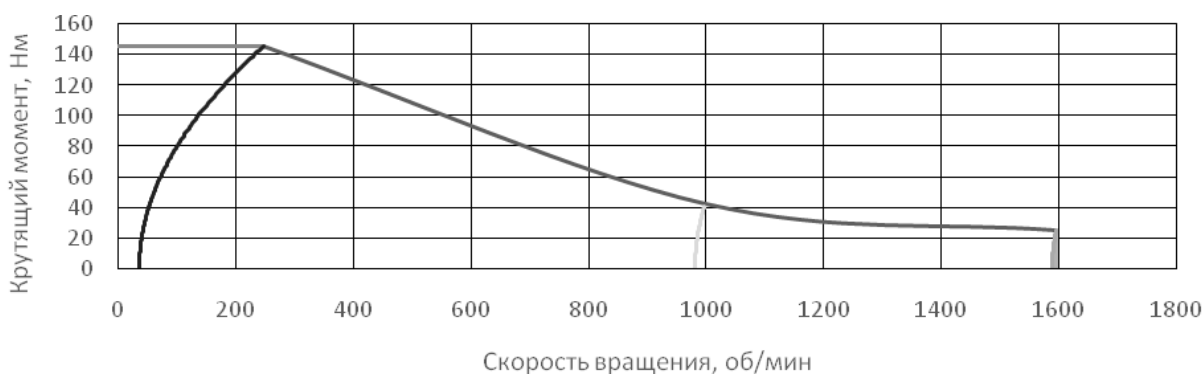


Рис. 7. Механическая и нагрузочные характеристики тягового электропривода

Диапазоны регулирования скорости и момента можно определить из:

$$K_{\omega} = K_v; \quad (25)$$

$$K_M = K_F. \quad (26)$$

Построим механическую характеристику расчетного тягового привода. Для этого воспользуемся рассчитанными точками предельной тяговой характеристики АТС и приведенными выше уравнениями (рис. 7).

В результате была получена механическая характеристика, которая позволяет проектировать электрическую машину с помощью современных программных комплексов.

Заключение. В результате была предложена методика тягового расчета автомобиля с электрической трансмиссией базирующаяся на ездовом цикле. Рассчитана предельная механическая характеристика тягового электропривода, которая удовлетворяет требованиям WLTC для соответствующего класса автомобиля. Были рассчитаны характерные точки предельной механической характеристики. Был осуществлен расчет для типового городского автомобиля С класса.

Литература

1. Радионов, А.А. Математическая модель движения автомобиля / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // *Инновационный транспорт*. – 2015. – № 4 (18). – С. 69–73.
2. Сташинов, Ю.П. Об оптимальной тяговой характеристике привода рудничного электровоза и путях ее реализации / Ю.П. Сташинов, А.С. Семенчук, Д.В. Волков // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2008. – № 7. – С. 354–358.
3. Аналитическое моделирование тяговой характеристики электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Н. Мифтахова // *Вестник Казанского технол. ун-та*. – 2014. – № 7. – С. 107–112.
4. Основы электрического транспорта / М.А. Слепцов, А.В. Прокопович, Т.И. Савинова, В.Д. Тулупов. – М.: Издат. центр «Академия», 2006. – 464 с.
5. Сташинов, Ю.П. Тяговый привод шахтного аккумуляторного электровоза на базе двигателей с независимыми обмотками возбуждения / Ю.П. Сташинов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2009. – № 12. – С. 210–215.
6. Бербиренков, И.А. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе / И.А. Бербиренков, В.В. Лохнин // *Электро. Электротехника, энергоэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2011. – № 1. – С. 27–28.
7. Петров, Б.И. Электропривод систем управления летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов / Б.И. Петров. – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
8. Бербиренков, И.А. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля / И.А. Бербиренков, В.В. Лохнин // *Известия Томского политехн. ун-та*. – 2011. – № 4. – С. 148–150.
9. Лохнин, В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля / В.В. Лохнин, И.А. Бербиренков // *Электротехн. и информ. комплексы и системы*. – 2011. – № 2. – С. 10–12.
10. Лашкевич, М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: дис. ... канд. техн. наук / М.М. Лашкевич. – М., 2013. – 175 с.
11. Козаченко, В.Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения / В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич // *Электротехн. и компьютер. системы*. – 2011. – № 3. – С. 138–139.
12. Туан, Н.М. Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями / Н.М. Туан, Н.Ч. Хай // *Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки*. – 2014. – № 8. – С. 184–187.
13. Козаченко, В.Ф. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением / В.Ф. Козаченко // *Электронные компоненты*. – 2005. – № 6. – С. 60–64.
14. Григорьев, М.А. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения и предельными характеристиками по быстрдействию и перегрузочным способностям: дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Григорьев. – Челябинск, 2013. – 325 с.

15. Петрушин А.Д. Выбор типа электродвигателя безредукторного исполнения для электропоезда / А.Д. Петрушин, Н.В. Гребенников, А.П. Пиотровский // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 49–53.
16. Реализация предельных характеристик в тяговом электроприводе / М.М. Григорьев, А.Н. Шишков, Д.А. Сычев и др. // Фундамент. и приклад. исследования в современном мире. – 2015. – № 10. – С. 17–22.
17. Островерхов, Н.Я. Система векторного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом / Н.Я. Островерхов // Электротехн. и компьютер. системы. – 2014. – № 15. – С. 41–44.
18. Чернышев, А.Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии / А.Д. Чернышев // Электротехника: сетевой электрон. науч. журн. – 2016. – № 3. – С. 47–52.
19. Радионов, А.А. Формирование технических требований к трансмиссии автомобиля / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 85–89.
20. Антипов, С.И. Современные испытательные циклы и их актуальность при создании алгоритма работы системы управления автомобиля с КЭУ / С.И. Антипов, Ю.В. Дементьев // Энерго- и ресурсосбережение: пром-сть и транспорт. – 2013. – № 10 (113). – С. 8–11.
21. Хегай, Ю.А. Перспективы развития электромобилей и автомобилей-гибридов / Ю.А. Хегай, Н.О. Тарасова, Е.С. Лукьяненко // Теория и практика обществ. развития. – 2014. – № 20. – С. 76–78.
22. Tutuianu, M. Technical Report: Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) / M. Tutuianu, 2013. – 103 с.
23. Sadeghi, S. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Serial Hybrid Vehicle / S. Sadeghi, M. Mirsalim, A.H. Isfahani // Acta Polytechnica Hungarica. – 2010. – № 1. – С. 51–71.
24. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой, Аналитическое моделирование тяговой системы электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2014. – № 7. – С. 129–132.

Чернышев Алексей Дмитриевич, аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, AD.Chernyshev@icloud.com.

Поступила в редакцию 6 ноября 2017 г.

DOI: 10.14529/engin180101

THE MECHANICAL CHARACTERISTICS ESTIMATION OF THE TRACTION MOTOR ELECTRIC TRANSMISSION OF THE VEHICLE

A.D. Chernyshev, AD.Chernyshev@icloud.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Research objective of this article is the ultimate mechanical characteristics estimation of the traction motor electric transmission of the vehicle by example of car. The author pointed parameters required for the calculation of the limit mechanical characteristics. In the article, the author gives basic types of electric motors used as traction motor: DC motor, asynchronous motor with squirrel cage rotor, synchronous motor with permanent magnet and switch reluctance motor. Main advantages and disadvantages of traction electric motor used for electric transmission

of vehicle are given. The author give forces acting on the vehicle. The traction balance based on these forces are given. The author justifies, that the best of curve type of ultimate of mechanical characteristics is the hyperbole. The author proposes to calculate the key points of hyperbole in accordance with operational parameters. The driving cycles, used for determining of fuel consumption and power reserve, are discussed in the article. The author considers it necessary to use modern test driving cycle WLTC for calculate of mechanical characteristics of traction electric motor for determine some parameters of vehicle and main mechanical characteristics of electric traction motor.

Keywords: vehicle, automobile, driving cycle, traction balance, traction electric motor, mechanical characteristic.

References

1. Radionov A.D., Chernyshev A.D. [Mathematical Model of Vehicle Motion]. *Innovatsionnyy transport*, 2015, no. 4, pp. 69–73. (in Russ.)
2. Stashinov Ju.P., Semenchuk A.S., Volkov D.V. *Ob optimal'noy tyagovoy kharakteristike privoda rudnichnogo elektrovoza i putyakh ee realizatsii* [About Optimum Traction Characteristic of the Drive of the Mine Electric Locomotive and Ways of its Realization]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2008, no. 7, pp. 354–358. (in Russ.)
3. Stroganov V.I., Kozlovskij V.N., Sorokin A.G., Miftahova L.N. *Analiticheskoe modelirovanie tyagovoy kharakteristiki elektromobiley i avtomobiley s kombinirovannoy energeticheskoy ustanovkoy* [Analytical Modeling of Traction Characteristics of Electric Vehicles and Vehicles with Combined Power Plant]. *Herald of Kazan Technological University*, 2014, no. 7, pp. 107–112. (in Russ.)
4. Sleptsov M.A., Prokopovich T.I. *Osnovy elektricheskogo transporta* [Fundamentals of Electric Transport]. *Moscow, Academia*, 2006. 464 p. (in Russ.)
5. Stashinov Yu.P. *Tyagovyy privod shakhtnogo akkumulyatornogo elektrovoza na baze dvigateley s nezavisimymi obmotkami vozbuzhdeniya* [Traction Drive Mine Battery Electric Motors on the Basis of Independent Excitation Windings]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchnotekhnicheskij zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2009, no. 12, pp. 210–215. (in Russ.)
6. Berbirenkov I.A., Lohnin V.V. *Tyagovye dvigateli na postoyannykh magnitakh v elektroprivode* [Traction Motors with Permanent Magnets in the Drive]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical Power Engineering, Electrical Engineering], 2011, no. 1, pp. 27–28. (in Russ.)
7. Petrov B.I. *Elektroprivod sistem upravleniya letatel'nykh apparatov: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Electric Aircraft Control Systems: a Manual for Schools]. *Moscow, Mechanical Engineering Publ.*, 1973. 360 p.
8. Berbirenkov I.A., Lohnin V.V. [Traction Motors with Permanent Magnets in the Drive Electric]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2011, no. 4, pp. 148–150. (in Russ.)
9. Berbirenkov I.A., Lohnin V.V. [Traction Motors with Permanent Magnets in Electric Drive Vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы I sistemy* [Electrical and Information Systems and Systems], 2011, no. 2, pp. 10–12. (in Russ.)
10. Lashkevich M.M. *Razrabotka sistemy upravleniya dlya elektrotransmissii s tyagovymi ventilno-induktornymi dvigatelyami: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of a Control System for the Electric Transmission with Traction Valve-Inductor Motor: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. *Moscow*, 2013. 175 p.
11. Kozachenko V.F., Lashkevich M.M. [Switched Reluctance Drive with External Excitation for the Traction Electric Drive]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy* [Electrotechnic and Computer Systems], 2011, no. 3, pp. 138–139. (in Russ.)
12. Tuan N.M., Khay N.Ch. [The Main Advantages of Switched Reluctance Motors Compared to Traditional Motors]. *Izvestiya Tulskegogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2014, no. 8, pp. 184–187. (in Russ.)

13. Kozachenko V.F. [Power on the Basis of Valve Inductor Machines with Electromagnetic Excitation]. *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2005, no. 6, pp. 60–64. (in Russ.)
14. Grigoryev M.A. *Sinkhronnyy reaktivnyy elektroprivod s nezavisimym upravleniem po kanalu vzbuzhdeniya i predel'nymi kharakteristikami po bystrodeystviyu i peregruzochnym sposobnostyam: dis. ... doktora tekhn. nauk* [Reluctance Drive with Independent Control Over the Channel Excitation and Limiting Characteristics for Speed and Overload Capacity: Dissertation of the Doctor of Technical Sciences]. Chelyabinsk, 2013. 325 p. (in Russ.)
15. Petrushin A.D., Grebennikov N.V., Piotrovskiy A.P. [Choice of Direct Drive Traction Motor Type for Electric Train]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Brief Summary of the Journal], 2010, no. 4, pp. 49–53. (in Russ.)
16. Grigor'ev M.M., Shishkov A.N., Sychev D.A., Men'shenin A.S., Khayatov E.S. [Realization of Electric Traction Drive Extreme Characteristics]. *Fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya v sovremennom mire* [Fundamental and Applied Research in the Modern World], 2015, no. 15, pp. 17–22. (in Russ.)
17. Ostroverkhov N.Ya. [The System of Vector Control of the Traction Valve Inductor Electric Drive]. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy* [Electrotechnic and Computer Systems], 2014, no. 15, pp. 41–44. (in Russ.)
18. Chernyshev A.D. [Comparative Analysis of Different Types of Electrical Motor as a Part of Traction Drive in Electrical Transmission]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2016, no. 3, pp. 85–89. (in Russ.)
19. Radionov A.A., Chernyshev A.D. [Formation of Technical Requirements for Automotive Transmission]. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and Production in the Urals], 2015, no. 11, pp. 85–89. (in Russ.)
20. Antipov S.I., Dement'ev Ju.V. [Modern Test Cycles and Their Relevance in the Creation of the Algorithm of the Car Control System with CEU]. *Izvestia VSTU*, 2013, no. 10, pp. 8–11.
21. Khegay Yu.A., Tarasova N.O., Lukyanenko E.S. [Development Prospects of Electric and Hybrid Vehicles]. *Theory and practice of social development*, 2014, no. 20, pp. 76–78.
22. Tutuianu M. *Technical Report: Development of a Worldwide Harmonized Light Duty Driving Test Cycle (WLTC)*, 2013. 103 p.
23. Sadeghi S., Mirsalim M., Isfahani A.H. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Serial Hybrid Vehicle. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2010, no. 1, pp. 51–71.
24. Stroganov V.I., Kozlovskiy V.N., Sorokin A.G., Miftakhova L.Kh. [Mathematical Modeling of Basic Processes of Electric Vehicles and Cars with Combined Power Plant, Analytical Modeling of Traction System of Electric Vehicles and Cars with Combined Power Plant]. *Herald of Kazan Technological University*, 2014, no. 7, pp. 129–132. (in Russ.)

Received 6 November 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Чернышев, А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства / А.Д. Чернышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 5–16. DOI: 10.14529/engin180101

FOR CITATION

Chernyshev A.D. The Mechanical Characteristics Estimation of the Traction Motor Electric Transmission of the Vehicle. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 5–16. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180101
