

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82

УДК 629.3.014

Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией

Канд. техн. наук, доц. Ч. И. Жданович¹⁾, инж. Н. В. Калинин¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Для сравнения работы трактора с электромеханической трансмиссией при установке накопителей и без них использовали зависимость момента на его колесах от теоретической скорости движения при работе тягового асинхронного электродвигателя на номинальном и предельно возможном режимах. Также были рассмотрены графики зависимости потребляемой тяговым асинхронным электродвигателем активной мощности и ее потерь от теоретической скорости движения трактора. При работе тягового асинхронного электродвигателя трактора без использования накопителей момент на колесах трактора ограничен: максимально возможным моментом электродвигателя при данной частоте питающего напряжения; максимальным значением мощности двигателя внутреннего сгорания, которая может быть передана тяговому асинхронному электродвигателю; сцеплением колес с опорной поверхностью. При работе тягового асинхронного электродвигателя трактора с использованием накопителей есть возможность кратковременно потребить мощность без учета второго ограничения, поскольку может быть использована мощность не только двигателя внутреннего сгорания, но и запасенная в накопителях энергии. Произведено сравнение характеристик при работе трактора как только на высшей передаче, так и на всех передачах (их две). Для всех возможных случаев (работа с накопителями и без них только на высшей передаче, работа с накопителями и без них при использовании всех передач) проанализирована работа трактора 5-го класса на различных операциях: пахоте, севе, культивации, бульдозерных работах, транспортном режиме. При этом использовали оборудование, агрегируемое с трактором 5-го класса.

Ключевые слова: момент, высшая передача, первая передача, режим работы, теоретическая скорость, тяговый асинхронный электродвигатель, активная мощность, коэффициенты приспособляемости

Для цитирования: Жданович, Ч. И. Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 73–82. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82

Efficiency Analysis of Energy Accumulating Mechanism for Tractor with Electromechanical Transmission

Ch. I. Zhdanovich¹⁾, N. V. Kalinin¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Dependence of tractor wheel torque on theoretical tractor motion speed has been used for comparison of tractor operation with electromechanical transmission with installation of energy accumulating mechanism and without its installation. In this case a traction asynchronous electric motor is operating under nominal and limit conditions. The paper also considers dependence diagrams of actual input power for the traction asynchronous electric motor and its losses due to theoretical tractor motion speed. Tractor wheel torque is limited during the operation of the traction asynchronous electric motor with energy accumulating mechanisms by the following factors: maximum electric motor torque at the given frequency of supply voltage; maximum value of internal combustion motor output which can be transferred to the traction asynchronous electric motor; grip of the wheels. During the operation of the traction asynchronous electric motor with energy accumulating

Адрес для переписки

Жданович Чеслав Иосифович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-96
trak_atf@bntu.by

Address for correspondence

Zhdanovich Cheslav I.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-96
trak_atf@bntu.by

mechanisms there is a possibility for short power consumption without regard to the second limitation because it is possible to use power not only of internal combustion motor but also the power which is stored in the energy accumulating mechanisms. Comparison of characteristics has been made when a tractor is operating at high gear and when it is operating at all gears (that is two gears). Operation of the 5th class tractors has been analyzed for all possible cases (operation with energy accumulating mechanisms and without the mechanisms while being operated at all gears) and various types of work: tilling, sowing, cultivation, bulldozing work, transport mode. In this case equipment has been used which is aggregated with the 5th class tractor.

Keywords: torque, high gear, low gear, operation mode, theoretical speed, traction asynchronous electric motor, actual power, adaptability coefficients

For citation: Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2017) Efficiency Analysis of Energy Accumulating Mechanism for Tractor with Electromechanical Transmission. *Science and Technology*, 16 (1), 73–82. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82 (in Russian)

Введение

Согласно [1, с. 15], тяговые качества двигателя оцениваются коэффициентами приспособляемости k_m (равен отношению максимального момента двигателя внутреннего сгорания (ДВС) к моменту ДВС при максимальной мощности) и снижения частоты вращения k_w (равен отношению оборотов ДВС при максимальной мощности к оборотам ДВС при максимальном моменте). С увеличением k_m повышаются способность трактора преодолевать возросшее сопротивление движению без перехода на низшую передачу и производительность агрегата по форсированию перегрузки, уменьшается степень снижения скорости [1, с. 15].

Обозначим: M_n – момент тягового асинхронного электродвигателя (ТАД) при номинальном скольжении в любой точке характеристики; M_{max} – то же ТАД при критическом скольжении в любой точке характеристики; M_{nn} – то же при номинальном скольжении, номинальном напряжении U_n и номинальной частоте f_{1n} питающего напряжения. Для ТАД при U_n и f_{1n} момент M_{max} может быть развит примерно в 2–3 раза больше M_{nn} в зависимости от конструкции конкретного ТАД. Если смотреть работу ТАД при отклонении от частоты питающего напряжения при предельном режиме работы [2], то видно, что момент M_{nn} может быть превышен в достаточно широком диапазоне питающих частот напряжения. Соответственно на достаточно большом участке характеристики ТАД может быть обеспечен довольно большой запас по моменту.

Однако если, например, при f_{1n} обеспечивать перегрузку по моменту, то ТАД должен развить большую мощность, чем при обеспечении момента M_{nn} . Согласно [3], максимальная мощность ТАД может быть ограничена мощностью ДВС: чтобы развить ТАД момент M_{max} , в 2–3 ра-

за больший M_{nn} при f_{1n} , ТАД должен развить значительно большую мощность, чем требуется для обеспечения M_{nn} . Откуда взять дополнительную мощность? Для этого можно использовать накопители энергии, которые способны подзарядиться при рекуперативном торможении либо при неполной загрузке генератора. Согласно [2], в каждой точке момент M_n и максимально возможный момент могут принимать различные величины, отличные от своих значений при f_{1n} , что также может повлиять на тяговые качества трактора и его тягово-скоростные свойства, поскольку при определенных значениях частоты питающего напряжения f_1 максимально возможный момент может оказаться даже меньше M_{nn} .

Проанализируем, позволит ли использование накопителей улучшить тяговые качества трактора и его тягово-скоростные свойства без использования коробки передач. Возьмем трактор 5-го класса, аналогичный 3023, с такими же ТАД и ДВС, как и в [3], и проведем расчеты согласно методикам [3–5] для различных режимов работы трактора 5-го класса [6, с. 69]. Сравним работу трактора с накопителями и без них. Разница при расчете с использованием накопителей в том, что не учитывается момент по мощности, обеспечиваемой ДВС, в то время как без применения накопителей он учитывается.

Работа трактора при использовании только высшей передачи

График зависимости $M_k(v_T)$ (M_k – момент на колесах трактора, v_T – теоретическая скорость движения трактора) при использовании только одной передачи с накопителями представлен на рис. 1а, без накопителей – на рис. 1б. График построен по методике [5] при коэффициенте сцепления $\varphi_{сц} = 0,6$ и передаточном отношении трансмиссии 35,57, как для высшей передачи [3].

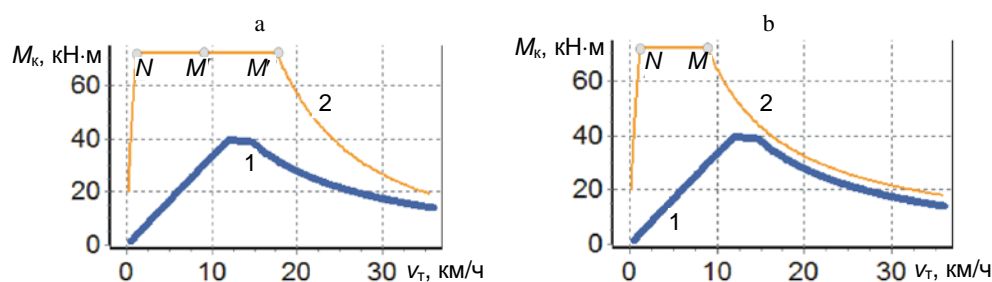


Рис. 1. Зависимость работы трактора при работе на высшей передаче: а – при использовании накопителей; б – без использования накопителей; 1 – номинальный режим; 2 – предельный режим

Fig. 1. Dependence of tractor operation at high gear: а – with accumulating mechanism; б – without accumulating mechanism; 1 – nominal mode; 2 – limit mode

Из рис. 1 видно, что:

а) использование накопителей при включенной высшей передаче не позволяет увеличить максимальный момент в диапазоне малых скоростей (рис. 1а, слева от точки N) при работе на предельном режиме ТАД, потребляемая мощность и потери ТАД будут одинаковыми (рис. 2а, б, кривые 2, 3 совпадают на участке AB); это вызвано тем, что максимальный момент на колесах в диапазоне малых частот питающего напряжения ограничен возможностями ТАД;

б) график при работе на номинальном режиме будет одинаковым при использовании и без использования накопителей (рис. 1, кривые 1), потребляемая мощность и потери мощности ТАД также будут одинаковыми (рис. 2, кривые 3);

в) использование накопителей позволяет увеличить момент на колесах при движении на скоростях более 8 км/ч с превышением номи-

нального режима работы ТАД, причем момент по сцеплению может быть достигнут до скорости 17 км/ч (рис. 1а, кривая 2, участок NM'), в то время как без накопителей – до скорости 8 км/ч (рис. 1б, кривая 2, участок NM); это вызвано тем, что ТАД при превышении определенной частоты питающего напряжения может значительно превысить номинальный момент в том случае, если будет возможность получить дополнительную мощность (рис. 2а, кривая 1), а без использования накопителей энергии максимальная потребляемая мощность ТАД ограничена возможностями ДВС (рис. 2а, кривая 2). Однако увеличение потребляемой мощности будет сопровождаться значительным повышением потерь мощности, потребляемой ТАД (рис. 2б, кривые 1, 2): согласно расчетам, до семи раз. Это значит, что длительная работа ТАД в таком режиме недопустима.

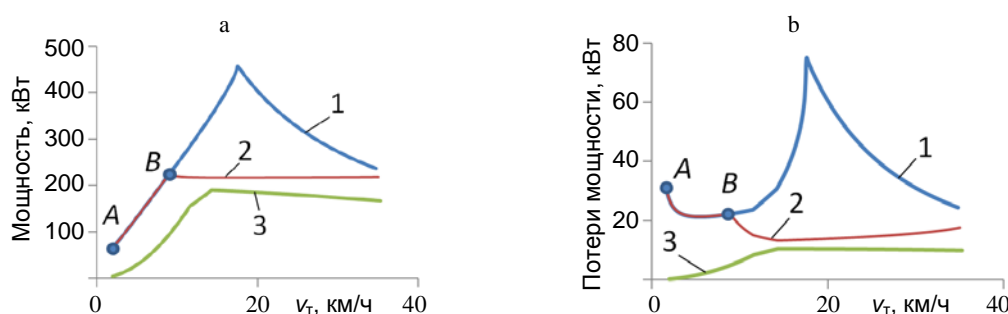


Рис. 2. Потребляемая тяговым асинхронным электродвигателем активная мощность (а) и ее потери (б) при работе трактора на высшей передаче:

- 1 – при использовании накопителей на предельном режиме работы электродвигателя;
- 2 – при ограничении потребляемой мощности электродвигателя по максимальной мощности двигателя внутреннего сгорания; 3 – при номинальном режиме работы электродвигателя

Fig. 2. Active power consumed by traction asynchronous electric motor (а) and active power losses (б) during tractor operation at high gear: 1 – while using accumulating mechanisms under limit mode of electric motor operation; 2 – while limiting the consumed power of electric motor according to maximum power of internal combustion engine; 3 – at nominal operating mode of electric motor

Работа трактора с использованием двух передач

График характеристики при работе трактора на двух передачах без использования накопителей [3] приведен на рис. 3.

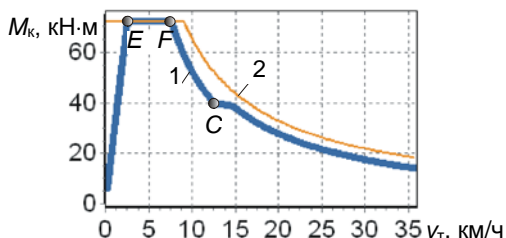


Рис. 3. Характеристика трактора без накопителей с использованием двух (1-й, 2-й) передач: C – точка переключения передач; EF – участок характеристики, на котором тяговый асинхронный электродвигатель развивает момент, меньше номинального (обозначения 1, 2 – на рис. 1)

Fig. 3. Characteristic of tractor without accumulating mechanisms while using two (1, 2) gears: C – point of gear change; EF – segment of characteristic when traction asynchronous electric motor is developing a torque which is less than nominal (symbols 1, 2 – in fig. 1)

По методике [5] построим характеристику (рис. 4) при установленных накопителях энергии с использованием того же диапазона частот подаваемого на обмотку статора ТАД напряжения и тех же передаточных чисел механической части трансмиссии (35,57 – на высшей и 103,00 – на первой передаче), которые были подобраны для работы без накопителей энергии в [3], и сравним с характеристикой на рис. 3. Как видно, при тех же диапазонах использования законов регулирования, что и в [3], получится провал кривой момента $KD'C'$ на предельной характеристике, т. е. момент по сцеплению на участке кривой $C'K$ не сможет быть реализован при разгоне с первой передачи, поскольку на участке KD' момент упадет. Выход из такой ситуации – увеличить число передач (что сделает установку накопителей нецелесообразной), либо при работе на предельной характеристике увеличить частотный диапазон работы ТАД на высшей передаче и уменьшить на первой (рис. 5). При этом диапазон работы на номинальной характеристике следует оставить таким же, как и на рис. 3, 4, поскольку при использовании измененного частотного диапазона на высшей передаче получится провал кривой при работе на номинальном режиме (рис. 5): момент на колесах будет

уменьшаться на участке HC с понижением скорости, а при переключении с первой передачи на высшую резко упадет (с точки D до точки C'). При возрастании сцепного веса и коэффициента сцепления провал $KD'C'$ (рис. 4) будет еще увеличиваться; придется расширять частотный диапазон в сторону малых частот напряжения, вследствие чего увеличится и длина отрезка CH (рис. 5).

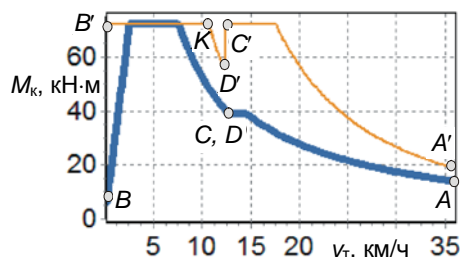


Рис. 4. Характеристика трактора при использовании накопителей: C, C' – точка включения высшей передачи; D, D' – точка выключения первой передачи; $AC, A'C'$ – участки кривых, соответствующие работе на первой передаче; $BD, B'D'$ – то же на высшей передаче

Fig. 4. Characteristic of tractor while using accumulating mechanisms: C, C' – points of high gear start; D, D' – points of 1st gear shut-down; $AC, A'C'$ – curved sections corresponding to operation at 1st gear; $BD, B'D'$ – the same at high gear

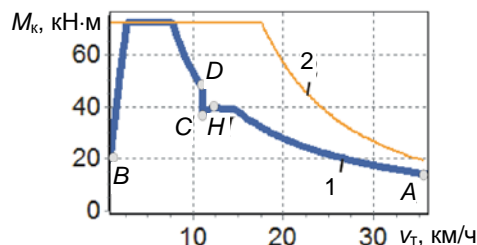


Рис. 5. Характеристика трактора с двухскоростной коробкой передач при использовании накопителей с измененным диапазоном частот напряжения тягового асинхронного электродвигателя (обозначения 1, 2 – на рис. 1)

Fig. 5. Characteristic of tractor with two-speed transmission while using accumulating mechanisms with changed voltage frequency range of traction asynchronous electric motor (symbols 1, 2 – in fig.1)

При малых скоростях движения трактора момент на колесах (рис. 3–5), потребляемая ТАД мощность (рис. 6, отрезок AB кривых 1, 2) и ее потери (рис. 7) будут одинаковы при установке и без установки накопителей. В случае превышения определенной скорости трактора, соответствующей точке B на рис. 6, ТАД может

дать больший момент, чем без использования накопителей, потребив при этом больше мощности (рис. 6), что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению потерь на первой (рис. 7, кривая 2) и высшей (рис. 7, кривая 1) передачах по сравнению с работой без использования накопителей (рис. 7, кривая 3). В номинальном режиме момент на колесах при работе с накопителями может быть таким же (рис. 4) или даже несколько меньшим на определенном участке характеристики (рис. 5), чем при работе без накопителей (рис. 3).

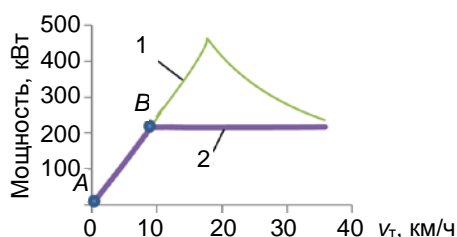


Рис. 6. График активной мощности, потребляемой тяговым асинхронным электродвигателем, в зависимости от скорости движения трактора при работе на предельном режиме электродвигателя и использовании двух передач: 1 – при работе с накопителями; 2 – без накопителей

Fig. 6. Diagram of active power consumed by traction asynchronous electric motor according to tractor speed while being operated at limit mode of electric motor and while using two gears: 1 – with accumulating mechanisms; 2 – without accumulating mechanisms

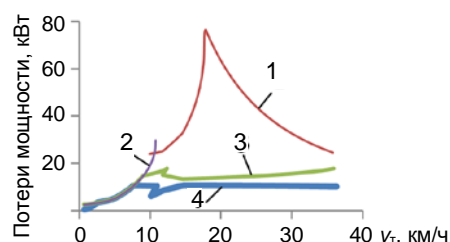


Рис. 7. График потерь мощности при работе трактора на двух передачах: 1, 2 – с накопителями на предельном режиме (1 – на высшей передаче, 2 – на первой); 3 – без накопителей на предельном режиме; 4 – на номинальном режиме

Fig. 7. Diagram of power losses in the process of tractor operation at two gears: 1, 2 – with accumulating mechanisms at limit mode (1 – at high gear, 2 – at 1st gear); 3 – without accumulating mechanisms at limit mode; 4 – at nominal mode

Работа трактора и тягового асинхронного электродвигателя на различных операциях с накопителями и без них

Работа трактора на транспортном режиме. Для работы с тяжелым прицепом массой 33 т [7] без использования накопителей энергии рассчитаем требуемые значения M_k при различных значениях коэффициента сопротивления качению f_c : для грунтовой дороги, залежи, стерни и асфальта [8, с. 150]. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Требуемые значения M_k при движении трактора с прицепом полной массой 33 т при коэффициенте сцепления 0,8

Required values of M_k when tractor is moving with a trailer having 33 t gross weight and 0.8 adhesion factor

Режим работы	Угол подъема, град.													
	0			1°			2°		3°		5°		6°	
	M_k , кН·м	v_t , км/ч	Запас M_k , кН·м	M_k , кН·м	v_t , км/ч	Запас M_k , кН·м	M_k , кН·м	v_t , км/ч	M_k , кН·м	v_t , км/ч	M_k , кН·м	v_t , км/ч	M_k , кН·м	v_t , км/ч
Грунтовая дорога ($f_c = 0,05$)	21,45	25,27	–	28,97	19,3	–	36,45	15,6	43,93	11,8	58,83	9,2	66,26	8,2
Залежь ($f_c = 0,08$)	34,32	16,40	–	41,85	12,1	–	49,33	10,6	56,80	9,4	71,67	7,7	79,07	7,0
Стерня ($f_c = 0,10$)	42,90	11,80	–	50,44	10,4	–	57,92	9,3	65,37	8,3	80,23	7,0	87,62	6,4
Асфальт ($f_c = 0,01$)	4,29	max	9,60	11,79	max	2,02	19,28	27,7	26,77	20,7	41,71	12,2	49,17	10,6

Скорость, при которой может быть обеспечен момент с сохранением номинального режима, определим по кривой, аналогичной графику на рис. 3 (кривая 1), но с большим значением коэффициента сцепления (увеличим до 0,8). Скорости менее 12,7 км/ч могут обеспечиваться только первой передачей при номинальном режиме; при использовании высшей передачи при скорости менее 12,7 км/ч будет резко падать момент (рис. 1).

Как видно из табл. 1, при качении по ровной асфальтовой дороге остается еще более чем двукратный запас момента. Причем запас момента будет увеличиваться при снижении скорости менее максимальной (рис. 3, кривая 1). При качении по асфальту с уклоном 5° уже потребуется включать первую передачу, чтобы сохранить номинальный режим работы ТАД; если использовать накопители и работать на высшей передаче, то при качении по асфальту с превышением номинального режима работы ТАД требуемый момент при уклоне 5° будет обеспечен на скорости 24,3 км/ч, а при 6° – на 21,6 км/ч, в то время как при тех же условиях без накопителей – на скоростях 15,7 и 13,2 км/ч соответственно.

При качении по стерне (табл. 1) даже на ровной поверхности момент в номинальном режиме работы ТАД не может быть обеспечен при работе на высшей передаче, т. е. придется использовать первую передачу. При качении по грунтовой дороге с сохранением номинального режима работы ТАД может возникнуть необходимость использовать первую передачу уже на подъеме в 3° , а при качении по залежи – на подъеме в 1° . Таким образом:

- для работы на транспортном режиме использование только высшей передачи может оказаться недостаточным при соблюдении номинального режима работы ТАД, а установка накопителей не влияет на номинальный режим работы ТАД при включенной высшей передаче; также установка накопителей не влияет на минимальную скорость движения, при которой будет обеспечен момент по сцеплению (точка *N* начала обеспечения момента по сцеплению в установившемся режиме работы ТАД будет одинаковой на рис. 1а, б);

- момент по сцеплению в процессе движения на высшей передаче может быть обеспечен при превышении номинального режима работы ТАД в обоих случаях: и при установке накопителей, и без установки накопителей; при установке накопителей он будет обеспечен при большей скорости движения, однако потери также будут больше (рис. 1, 2);

- при равномерном движении по ровной асфальтовой поверхности без накопителей даже на максимальной скорости с тяжелым прицепом остается более чем двукратный запас по моменту на колесах при номинальном режиме работы ТАД; т. е. может быть обеспечен разгон до данной скорости движения на номинальном режиме без установки накопителей.

Работа трактора на пахоте и бульдозерных работах. Сравнение работы трактора на пахоте и бульдозерных работах будем проводить для следующих четырех случаев:

- 1) только на высшей передаче с накопителями (рис. 1а);

- 2) при использовании всех передач (их две) с накопителями (для предельного режима – рис. 5, кривая 2; для номинального режима – рис. 4, график АВ);

- 3) при использовании всех передач (две) без накопителей (рис. 3);

- 4) только на высшей передаче без накопителей (рис. 1б).

Для бульдозерных работ требуемая скорость трактора составит 2,5–4,0 км/ч [9, с. 19], для пахоты при работе: с плугом ппо.9.30/45 – до 8,0–11,0 км/ч, с плугом ппн.8.30/50 – до 7,0–10,0 км/ч [10].

Для работы на пахоте и на бульдозерных работах необходимо, чтобы трактор мог развить максимально возможный момент по сцеплению. По графикам видно, что для всех случаев момент по сцеплению при предельном установившемся режиме работы ТАД может быть достигнут только начиная с определенной скорости движения, а на самых минимальных скоростях он достигнут не будет (ТАД не сможет дать требуемый для этого момент при малых оборотах). Произведем расчет по [5], при какой минимальной теоретической скорости v_t трактор сможет развить момент по сцеплению при

предельном установившемся режиме работы ТАД для значений коэффициента сцепления $\varphi_{\text{сц}}$ колес с опорной поверхностью 0,6 и 0,8 при эксплуатационной (12800 кг) и максимальной (18000 кг) массе трактора. Данные расчета приведены в табл. 2. Результаты при использовании и без использования накопителей будут одинаковы.

Таблица 2

Значения минимальной скорости движения трактора, при которых он сможет развить момент на колесах, равный моменту по сцеплению
Values of minimum speed for tractor movement when tractor can develop wheel torque which is equal to adhesion torque

Масса трактора, кг	$\varphi_{\text{сц}}$	Число передач			
		1	2	1	2
		$v_{\text{тmin}}$, км/ч		f_1 , Гц	
12800	0,6	1,56	0,16	10	3
12800	0,8	2,54	0,21	16	4
18000	0,6	2,86	0,20	18	4
18000	0,8	4,61	0,32	27	6

Как видно из табл. 2, при наличии двух передач трактор при подобранных передаточных числах (случаи 2, 3) может развить момент, равный моменту по сцеплению, уже при теоретической скорости 0,32 км/ч даже при максимальной загрузке и большом $\varphi_{\text{сц}}$. В то время как при использовании только высшей передачи (случаи 1, 4) при тех же условиях трактор может развить максимальный момент только при теоретической скорости 4,61 км/ч. То есть при скорости бульдозерных работ 2,5–4,0 км/ч в случаях 1 и 4 момент по сцеплению может быть не обеспечен; если момент по сцеплению в диапазоне 2,5–4,0 км/ч будет обеспечен при определенных условиях, то отсутствие возможности обеспечить его на более низких скоростях движения трактора в установившемся режиме работы ТАД могут привести к сложности трогания с места с заглубленным отвалом, а также потери мощности будут в несколько раз больше (рис. 2б, отрезок АВ кривых 1, 2), чем при номинальном режиме работы ТАД (рис. 2б, кривая 3).

Расчеты показывают, что момент по сцеплению при номинальном режиме работы ТАД для случаев 2, 3 будет обеспечен начиная с теоретической скорости 2,56 км/ч при $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$ (рис. 3, точка E) и 3,39 км/ч при $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$, однако при работе с превышением номинального режима работы ТАД в диапазоне до 2,56 км/ч при $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$ потери мощности (рис. 7, кривая 2) не будут больше, чем максимальные потери в номинальном (рис. 7, кривая 4) режиме работы ТАД; аналогично в диапазоне до 3,39 км/ч при $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$ (рис. 8).

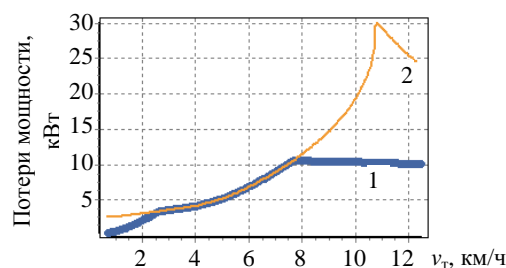


Рис. 8. График потерь мощности тяговым асинхронным электродвигателем при работе на первой передаче с передаточным отношением 103 и $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$ в режиме работы: 1 – номинальном; 2 – предельном
 Fig. 8. Diagram of power losses by traction asynchronous electric motor while being operated at 1st gear with transmission ratio 103 and $\varphi_{\text{сц}} = 0.8$ at operating modes: 1 – nominal; 2 – limit

По графикам рис. 1 видно, что при работе на пахоте в случаях 1, 4 трактор не сможет развить момент по сцеплению при номинальном режиме работы ТАД. При обеспечении момента по сцеплению с превышением номинального режима работы ТАД для скорости 7,62 км/ч, соответствующей точке F (рис. 3) при $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$, потери мощности будут в 2,18 раза больше, чем для случаев 2, 3 при номинальном режиме ТАД для той же скорости. Таким образом, для работы на пахоте и бульдозерных работах случаи 1, 4 неприемлемы.

Теперь сравним случаи 2 и 3. Для случаев 2 и 3 кривая $M_{\text{к}}(v_{\text{т}})$ при работе на номинальном режиме будет совершенно одинаковой, а момент по сцеплению при работе на предельном режиме может быть развит при одной и той же минимальной скорости (табл. 2), т. е. случай 2 при бульдозерных работах и работе на пахоте не дает преимуществ перед случаем 3.

Работа трактора с посевным агрегатом. Расчет проведем для работы с посевным агрегатом [11] согласно методике [12, с. 124–125]. Рассчитаем силу сопротивления орудия $R_{\text{мн}}$,

силу сопротивления движению трактора F_k и суммарную силу сопротивления движению трактора с орудием при севе $F_{k\Sigma}$ ($f_c = 0,18$) [8, с. 150]. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет силы сопротивления орудия и суммарной силы сопротивления движению трактора для различных углов уклона местности
Calculation of tool resistance force and total resistance force to tractor movement for various angles of surface slope

Показатель	Угол уклона, град.				
	0	1°	6°	12°	20°
R_{MH} , кН	10,595	12,649	22,900	35,070	42,957
F_k , кН	22,602	24,790	35,603	48,215	64,186
$F_{k\Sigma}$, кН	33,197	37,439	58,503	83,285	107,143

Как видно из табл. 3, при угле уклона 6° требуемая сила тяги трактора может оказаться примерно равной силе тяги по сцеплению при $\varphi_{сц} = 0,5$ (таким будет $\varphi_{сц}$ для посевных работ согласно [8, с. 150]). Если уклон опорной поверхности 0–1° с кратковременным уклоном до 6°, то установка накопителей может обеспечить возможность движения трактора с постоянной максимальной для сева скоростью 18 км/ч [11]: при подъеме до 6° будет достигаться момент по сцеплению за счет использования энергии накопителей, а при спуске до 6° – запасаться энергия в накопителях. Однако при длительных уклонах 6° это невозможно, поскольку потребуется большая емкость накопителей, и будет сильный нагрев ТАД.

Работа трактора с культиватором. При работе с культиватором типа [13], согласно расчету по [14, с. 37] и [12], требуемый момент в номинальном режиме работы ТАД при углах подъема до 5°–6° может быть обеспечен и при работе на высшей передаче, а на предельном режиме работы без накопителей есть возможность развить момент по сцеплению до рабочей скорости (рис. 1б, точка М). В результате установки накопителей момент может быть кратковременно увеличен уже за пределами диапазона скоростей работы на культивации (рис. 1а, участок ММ'), т. е. нет смысла в установке накопителей. То же и при работе на первой передаче (рис. 3–5).

Возможность использования тягового асинхронного электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания меньшей мощности при установке накопителей

Использование ТАД меньшей мощности приведет к тому, что упадет скорость работы трактора на пахоте при номинальном режиме работы ТАД: точка F (рис. 3), показывающая максимальную скорость, при которой может быть достигнут момент по сцеплению с соблюдением номинального режима работы ТАД, сместится влево, а значит, упадет и максимально возможный момент по сцеплению. Использование ДВС меньшей мощности также приведет к снижению скорости работы трактора на пахоте, поскольку в этом случае момент, полученный при номинальном режиме ТАД, не будет обеспечен мощностью ДВС, а продолжительное время работать от накопителя энергии трактор не сможет. На рис. 3 момент на колесах при работе на предельном режиме (кривая 2), ограниченном мощностью ДВС, будет немного выше, чем момент при работе ТАД на номинальном режиме (кривая 1). Однако уменьшать мощность ДВС до такого значения, чтобы обе кривые совпали, не следует, поскольку нужен определенный запас мощности ДВС на привод вспомогательных агрегатов, а также часть мощности ДВС используется для системы охлаждения ТАД.

ВЫВОДЫ

1. Использование накопителей энергии для трактора 5-го класса с электромеханической трансмиссией не изменяет кривую зависимости момента на колесах трактора от скорости движения трактора при номинальном режиме работы тягового асинхронного электродвигателя при тех же передаточных числах.

2. При малых оборотах тягового асинхронного электродвигателя, соответствующих регулированию в диапазоне низких частот питающего напряжения, использование накопителей энергии не увеличивает максимальный момент на колесах (и при работе только на высшей передаче, и при работе с двумя передачами), если допустить превышение номинального режима работы тягового асинхронного электродвигателя.

ля. Это объясняется ограничением максимального момента на колесах по сцеплению, а на совсем малых оборотах — возможностями тягового асинхронного электродвигателя. При работе на высшей передаче трактор может развить на колесах максимально возможный момент по сцеплению и без использования накопителей; это будет при несколько меньшей скорости движения, чем если использовать накопители, а номинальный режим работы электродвигателя будет превышен в обоих случаях.

3. Использование накопителей энергии не дает возможности исключить коробку передач из трансмиссии, поскольку в этом случае не будет обеспечен требуемый момент на пахоте при номинальном режиме работы тягового асинхронного электродвигателя. При работе на транспорте режиме с использованием тяжелого прицепа по асфальтовому покрытию без уклона имеется более чем двукратный запас момента без использования накопителей при номинальном режиме работы электродвигателя, т. е. трактор может разогнаться до максимальной скорости и без использования накопителей. Возможность обеспечения момента по сцеплению на высшей передаче без использования накопителей позволит преодолевать кратковременно увеличенное дорожное сопротивление для транспортного режима на высшей передаче. При качении по поверхности с большим сопротивлением качению может возникнуть необходимость работать на первой передаче в целях уменьшения потерь мощности тяговым асинхронным электродвигателем.

4. Возможности использовать тяговый асинхронный электродвигатель или двигатель внутреннего сгорания меньшей мощности установка накопителей не дает, поскольку в этом случае будет снижена скорость работы трактора на пахоте. Накопители энергии могут при определенных условиях обеспечить равномерную скорость движения при севе, равную максимальному установленному значению для работающих с трактором 5-го класса посевных агрегатов. Таким образом, применение накопителей энергии не дает преимуществ при работе трактора 5-го класса на пахоте и бульдозерных работах и практически не дает преимуществ при работе на транспортном режиме; опреде-

ленные преимущества использования накопителей могут быть при посевных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анилович, В. Я. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов / В. Я. Анилович, Ю. Т. Водолаженко. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
2. Жданович, Ч. И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2015. № 3. С. 60–64.
3. Жданович, Ч. И. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 29–36.
4. Жданович, Ч. И. Зависимость характеристик трактора с механической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск: БНТУ, 2013. С. 60–67.
5. Жданович, Ч. И. Определение максимального момента на колесах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск: БНТУ, 2013. С. 54–59.
6. Тракторы. Дипломное проектирование / А. Ф. Андреев [и др.]; под общ. ред. В. В. Будько. Минск: Вышэйш. шк., 1985. 160 с.
7. Монолитный прицеп тридент рпоар Т682 [Электронный ресурс] // ООО «АгроВектор» (г. Нижний Новгород). 2012. Режим доступа: http://agrovektor.ru/mebel/monolitnyj_pricep_tridem_t682_21_tonna.html. Дата доступа: 24.04.2013.
8. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
9. Холодов, А. М. Землеройно-транспортные машины / А. М. Холодов, В. В. Ничке, Л. В. Назаров. Харьков: Вища шк., 1982. 192 с.
10. Создание на РУП «Минский тракторный завод» многокорпусных плугов для высокопроизводительной обработки почвы [Электронный ресурс] // Министерство промышленности Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. Дата доступа: 04.02.2013.
11. Агрегат почвообрабатывающий посевной многофункциональный АППМ-6 [Электронный ресурс] // Миннойтовский ремонтный завод. 2013. Режим доступа: <http://www.mrz.by/catalog/products-catalog/agregat-appm-6.html>. Дата доступа 22.04.2013.

12. Свиричевский, Б. С. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Б. С. Свиричевский. М.: Госуд. изд-во сельскохоз. лит-ры, 1958. 660 с.
13. Культиватор паровой КП-9 [Электронный ресурс] // Минойтовский ремонтный завод. 2013. Режим доступа: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.131/AC:-1.180003630783/>. Дата доступа: 22.04.2013.
14. Машиностроение: энциклопед. справ.: в 15 т. / редкол.: Е. А. Чудаков (гл. ред.) [и др.]. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1948. Т. 12. Раздел четвертый. Конструирование и расчет машин. 716 с.

Поступила 17.10.2016

Подписана в печать 20.12.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

REFERENCES

1. Anilovich V. Ya., Vodolazhchenko Yu. T. (1976) *Designing and Calculation of Agricultural Tractors*. Moscow, Mashinostroyeniye. 456 (in Russian).
2. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2015) Selection of Method for Regulation of Tractor Propulsion Asynchronous Electric Motor and Construction of Mechanical Characteristics. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (3), 60–64 (in Russian).
3. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2016) Determination of Transmission Gear Ratio in Mechanical Part of Tractor Electro-Mechanical Transmission. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 15 (1), 29–36 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-29-36.
4. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Characteristics Dependence of Tractor with Mechanical Transmission on Temperature of Windings in Propulsion Electric Engine. *Problemy Proektirovaniia i Razvitiia Traktorov, Mobilnykh Mashin, Gorodskogo Elektrotransporta: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. 60-letiiu Kafedry «Traktory» BNTU* [Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machines, Urban Electric Transport: Proceedings of International Scientific and Technical Conference devoted to 60th Anniversary of “Tractors” Department at the Belarusian National Technical University]. Minsk, Belarusian National Technical University, 60–67 (in Russian).
5. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Determination of Maximum Moment on Wheels of Tractor with Electric and Mechanical Transmission. *Problemy Proektirovaniia i Razvitiia Traktorov, Mobilnykh Mashin, Gorodskogo Elektrotransporta: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. 60-letiiu Kafedry «Traktory» BNTU* [Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machines, Urban Electric Transport: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Devoted to 60th Anniversary of “Tractors” Department at the Belarusian National Technical University], Minsk, Belarusian National Technical University, 54–59 (in Russian).
6. Andreev A. F., Atamanov Iu. E., Budko V. V., Boikov V. P., Vasilev V. T., Kabanov V. I., Lefarov A. Kh., Masiuk S. K. (1985) *Tractors. Graduation Design Engineering*. Minsk, Vysheishaya Shkola. 160 (in Russian).
7. Monolithic Trailer of T682 Tridem Pronar Model. *JSC “AgroVektor” (Nizhny Novgorod)*. 2012. Available at: http://agrovektor.su/mebel/monolitnyj_pricep_tridem_t682_21_tonna_html. (Accessed 24 April 2013) (in Russian).
8. Guskov V. V., Velev N. N., Atamanov Iu. E., Bocharov N. F., Ksenevich I. P., Solonskii A. S. (1988) *Tractors: Theory*. Moscow, Mashinostroyeniye. 376 (in Russian).
9. Kholodov A. M., Nichke V. V., Nazarov L. V. (1982) *Earthmoving and Transport Machines*. Kharkov, Vyshcha Shkola Publ. 192 (in Russian).
10. Development of Multibottom Ploughs for High-Efficiency Soil Treatment at RUE “Minsk Tractor Works”. *Ministry of Industry of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. (Accessed: 4 Februar 2013) (in Russian).
11. Multi-Functional Tillage and Seeding Machine. *Minoytovsky Repair Plant*. Favailable at: <http://www.mrz.by/catalog/products-catalog/agregat-appm-6.html>. (Accessed 22 April 2013) (in Russian).
12. Svirshchevsky B. S. (1958) *Operation of Machine and Tractor Fleet*. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature. 660 (in Russian).
13. Field Cultivator КП-9. *Minoytovsky Repair Plant*. Available at: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.131/AC:-1.180003630783/>. (Accessed 22 April 2013) (in Russian).
14. Tchudakov E. A. (ed.), Aleksandrov V. I., Badylkes I. S., Vasilenko I. F., Veinberg B. S., Gladkov N. G., Gorbunov M. P., Grossman R. I., Dollezhai N. A., Zvolinskii N. P., Ziablov V. A., Martens L. K. (1948) *Mechanical Engineering. Encyclopedic Reference Book. Vol. 12. 4th Section. Designing and Calculation of Machines*. Moscow, State Scientific Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 716 (in Russian).

Received: 17.10.2016

Accepted: 20.12.2016

Published online: 30.01.2017