

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.112(082)

**ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
САМОХОДНОГО ШАХТНОГО ВАГОНА**

Таяновский Г.А., Басалай Г.А., Матусович Э.В., Загоровский Ю.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

С целью исследования разработанных технических предложений различных способов совершенствования привода колес самоходного вагона (ШВС) и последующего выбора рациональной схемы и параметров привода колес разработаны методические положения, необходимый программный модуль в технологии электронных таблиц и выполнены с его помощью расчеты тягово-динамической характеристики ШВС, оснащенного электродвигателем с переменным числом пар полюсов, для варианта установки в приводы колес по бортам фрикционов с двумя передачами.

Введение

Методика построения тягово-динамической характеристики (ТДХ) самоходного шахтного вагона (ШВС) базируется на известной методике для колесных машин с двигателями внутреннего сгорания [1]. Однако специфика механической рабочей характеристики асинхронного электродвигателя (ЭЛД) с изменяемым числом пар полюсов для получения трех передач, от которого приводятся колеса ШВС (в нашем случае используются два ЭЛД, по одному на каждый борт ШВС) (рисунок 1), вносит некоторые особенности в построение ТДХ ШВС.



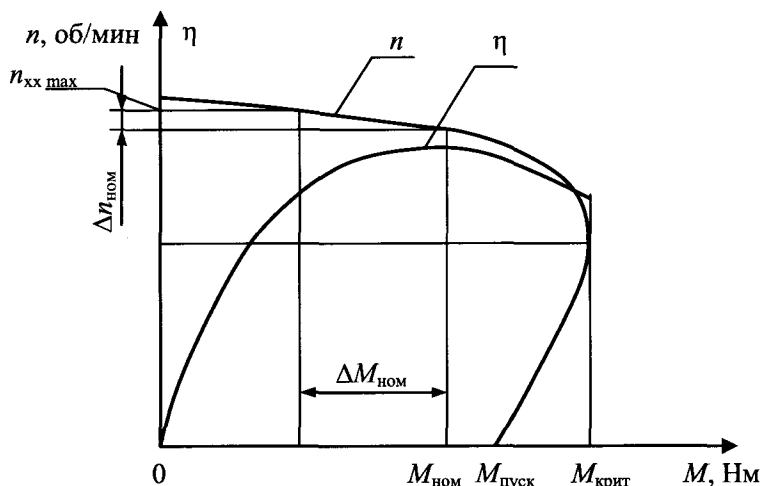
Рисунок 1 – Привод колес шахтного самоходного вагона ВС-17

В ШВС, например, ВС-17 его ЭЛД, обеспечивающие три рабочие передачи, имеют три скоростных рабочих диапазона. Как известно, динамический фактор D равен отношению определяемого ЭЛД ШВС потенциального суммарного тягового усилия P_{Σ} колес движителя за вычетом аэродинамического сопротивления P_w к текущему весу $G_{\text{ваг}}$ самоходного вагона как машины переменной массы [1]. В связи с двумя характерными эксплуатационными состояниями ШВС (порожним и полностью груженым) имеет практический интерес определение ТДХ для этих двух состояний.

Полезность ТДХ ШВС состоит в наглядности оценки эффективности вагона в преодолении всего спектра условий движения, различающихся по уклону α и сопротивлению качению f колес на различных поверхностях движения, в зависимости от скорости движения v . ТДХ необходима при обосновании выбора устанавливаемых на ШВС ЭЛД. Чтобы гарантировать требуемый по условиям эксплуатации потенциал проходимости машины, анализ ТДХ выполняется уже на стадии создания ШВС. ТДХ строится с допущением об отсутствии кинематического рассогласования окружных скоростей передних и задних колес между собой и между колесами разных бортов.

Особенности построения ТДХ колесной машины с электродвигателем

На рисунке 2 показан общий вид механической характеристики приводного ЭЛД.



n , $n_{\text{хх max}}$, $\Delta n_{\text{ном}}$ — частота вращения, частота при холостом ходе, диапазон изменения частоты при установившихся режимах нагружения ЭЛД со стороны потребителя на высшей передаче; M , $M_{\text{пуск}}$, $M_{\text{крит}}$, $M_{\text{ном}}$, $\Delta M_{\text{ном}}$ — крутящий момент, момент при пуске, критический и номинальный крутящий момент, диапазон изменения момента в диапазоне эксплуатационных режимов нагружения на высшей передаче ЭЛД; η — КПД ЭЛД

Рисунок 2 — Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Обычно по механической характеристике упомянутые ЭЛД ШВС имеют коэффициент запаса крутящего момента

$$K_{\text{зап}} = \frac{M_{\text{крит}}}{M_{\text{ном}}} = 1,2 \dots 1,3. \quad (1)$$

При $M_{\text{ном}}$ ЭЛД имеет максимальный КПД. Однако в текущем рабочем состоянии ЭЛД будет выходить на режим, отстоящий от $M_{\text{ном}}$ на величину $\Delta M_{\text{ном}}$ и при большей

частоте вращения n , $n_i = n_{\text{ном}} + \Delta n_{\text{ном } i}$, при которой КПД окажется несколько ниже, чем на номинальном режиме.

Для удобства расчета ТДХ ШВС получим скоростную характеристику ЭЛД АВТ15-4/6/12, который установлен в приводе колес самоходного шахтного вагона ВС-17, следующим способом [2, 3].

Механическая характеристика асинхронного двигателя выражает зависимость между электромагнитным моментом M и частотой вращения n , либо скольжением S . Скольжение – это величина, которая показывает насколько частота вращения магнитного поля опережает частоту вращения ротора.

Благодаря механической характеристике появляется возможность определить: к какому варианту привода колес ШВС больше подходит двигатель, на каком участке сохраняется его устойчивая работа, оценить перегрузочную способность и другое. Паспортные данные ЭЛД для построения механической характеристики представлены в таблице.

Таблица – Необходимые паспортные данные электродвигателя для построения механической характеристики

Число полюсов	Мощность номинальная, кВт	Частота вращения синхронная, об/мин	Скольжение номинальное	Кратность максимального момента
4	22	1500	0,08	2,8
6	46	1000	0,14	2,8
12	23	500	0,13	3,6

Для построения необходимо произвести расчет номинального момента:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ном}}$ – мощность номинальная, кВт;

$n_{\text{ном}}$ – частота вращения номинальная, об/мин:

$$n_{\text{ном}} = n_0 \cdot (1 - S_{\text{ном}}), \text{ об/мин}, \quad (3)$$

где n_0 – частота вращения синхронная, об/мин;

$S_{\text{ном}}$ – скольжение номинальное.

Определим номинальную частоту вращения для включенных обмоток ротора:

- четырех полюсов: $n_{\text{ном}(4)} = 1500 \cdot (1 - 0,08) = 1380$ об/мин;

- шести полюсов: $n_{\text{ном}(6)} = 1000 \cdot (1 - 0,14) = 860$ об/мин;

- двенадцати полюсов: $n_{\text{ном}(12)} = 500 \cdot (1 - 0,13) = 435$ об/мин.

Определим номинальный момент для включенных обмоток ротора:

- четырех полюсов: $M_{\text{ном}(4)} = 9550 \cdot \frac{22}{1380} = 152,25$ Н·м;

- шести полюсов: $M_{\text{ном}(6)} = 9550 \cdot \frac{46}{860} = 510,81$ Н·м;

- двенадцати полюсов: $M_{\text{ном}(12)} = 9550 \cdot \frac{23}{435} = 504,94 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Рассчитаем критическое скольжение по формуле

$$S_{\text{крит}} = S_{\text{ном}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (4)$$

где λ – кратность максимального момента (перегрузочная способность).

Определим критическое скольжение для включенных обмоток ротора:

- четырех полюсов: $S_{\text{крит}(4)} = 0,08 \cdot (2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1}) = 0,4332$;

- шести полюсов: $S_{\text{крит}(6)} = 0,14 \cdot (2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1}) = 0,7581$;

- двенадцати полюсов: $S_{\text{крит}(12)} = 0,13 \cdot (3,6 + \sqrt{3,6^2 - 1}) = 0,9176$.

Рассчитаем критический момент по формуле:

$$M_{\text{крит}} = \lambda \cdot M_{\text{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5)$$

Для включенных обмоток ротора:

- четырех полюсов: $M_{\text{крит}(4)} = 2,8 \cdot 152,25 = 426,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

- шести полюсов: $M_{\text{крит}(6)} = 2,8 \cdot 510,81 = 1430,268 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

- двенадцати полюсов: $M_{\text{крит}(12)} = 3,6 \cdot 504,94 = 1817,784 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Итак, определены основные точки характеристики, но для ее построения их недостаточно. Поэтому, с помощью упрощенной формулы Клосса [2] рассчитаем моменты для других значений скольжений.

Упрощенная формула Клосса выглядит следующим образом:

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (6)$$

Для удобства расчеты сведем в таблицы. Рассчитаем для каждого значения скольжения момент и частоту вращения. Например, для включенной четырехполюсной обмотки ротора для значения скольжения 0,2:

$$M = \frac{2 \cdot 426,3}{0,2/0,4332 + 0,4332/0,2} = 324,46, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Частоту вращения выразим из формулы для определения скольжения:

$$n = n_0 \cdot (1 - S) = 1500 \cdot (1 - 0,2) = 1200, \text{ об/мин}. \quad (7)$$

Подобным образом рассчитываются остальные значения.

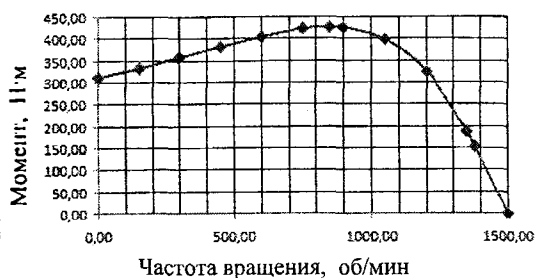
Теперь на основании расчетов можно построить саму механическую характеристику (рисунок 2). Однако для построения ТДХ ШВС необходима скоростная характеристика, которую получим перестроением из механической характеристики электродвигателя по упомянутым расчетным данным (рисунок 3).

<i>n</i>	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>M</i>
0,00	310,98	0,00	1377,16	0,00	1811,09
150,00	333,13	100,00	1409,50	41,21	1817,80
300,00	356,99	200,00	1428,22	50,00	1817,45
450,00	381,51	241,85	1430,28	100,00	1800,83
600,00	404,63	300,00	1425,70	150,00	1753,20
750,00	421,94	400,00	1392,00	200,00	1665,20
850,16	426,29	500,00	1314,72	250,00	1527,49
900,00	424,94	600,00	1180,60	300,00	1331,76
1050,00	399,05	700,00	978,68	350,00	1073,80
1200,00	324,46	800,00	705,52	400,00	756,47
1350,00	186,85	885,00	410,81	435,00	504,93
1380,00	152,26	1000,00	0,00	500,00	0,00
1500,00	0,00				

Скоростная характеристика при 6-ти парах полюсов



Скоростная характеристика при 4-х парах полюсов



Скоростная характеристика при 12-ти парах полюсов

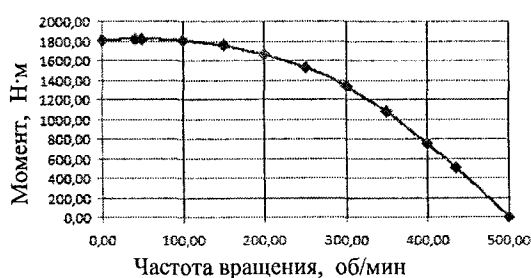


Рисунок 3 – Скоростные характеристики ЭЛД АВТ15-4/6/12

Используемые рабочие участки этих характеристик при длительной эксплуатации ЭЛД начинаются при некоторых значениях частоты вращения ротора электродвигателя, которые незначительно отстают от частот вращения при критических значениях моментов.

На рабочих участках скоростную характеристику ЭЛД (рисунок 3) можно с достаточной точностью описать следующими математическими выражениями:

$$M = \begin{cases} M_{\text{НОМ}} = 1 - \frac{n - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}} - n_{\text{ХХ макс}}}, & \text{при } n \geq n_{M_{\text{НОМ}}} \\ M_{\text{КРИТ}} = a \cdot (n_{\text{НОМ}} + n_{M_{\text{КРИТ}}})^2, & \text{при } n_{\text{НОМ}} \geq n \geq n_{M_{\text{КРИТ}}} \end{cases}, \quad (8)$$

где

$$a = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot M_{\text{КРИТ}}}{(n_{\text{НОМ}} + n_{M_{\text{КРИТ}}})^2},$$

$$\frac{M - M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} - 0} = \frac{n - n_{M_{\text{НОМ}}}}{n_{M_{\text{НОМ}}} - n_{\text{ХХ макс}}}$$

ИЛИ

$$M = M_{\text{НОМ}} \left(1 - \frac{n - n_{M_{\text{НОМ}}}}{n_{M_{\text{НОМ}}} - n_{\text{ХХ макс}}} \right). \quad (9)$$

Причем для каждой настройки ЭЛД необходимо в приведенном выражении подставлять соответствующие параметры механической характеристики. Так как штатная трансмиссия ШВС не имеет коробки передач, то его ТДХ будет представлять собой

кривые, соответствующие ветвям механической характеристики при конкретном числе пар полюсов, подключенных в данный момент.

Считаем машину симметричной с равными нагрузками на колеса, которые имеют одинаковые характеристики. Удельная суммарная окружная теоретическая сила тяги двигателя по ЭЛД выражается:

$$D = P_{\text{уд.тяги}} = \frac{M(n) \cdot U \cdot \eta_{\text{тр}} / r_{\text{к}}^0 - k \cdot F_{\text{вар}} \cdot v^2}{G_{\text{вар}}}, \quad (10)$$

где U , $\eta_{\text{тр}}$ – передаточное отношение и КПД привода колес ШВС;

$F_{\text{вар}}$, k – лобовая площадь и коэффициент аэродинамического сопротивления ШВС;

$r_{\text{к}}^0$ – радиус качения ведущих колес ШВС в ведомом режиме.

Теоретическая скорость движения

$$v_n^m = n \cdot \frac{1}{U} \cdot r_{\text{к}}^0. \quad (11)$$

Используя далее известный порядок построения ТДХ колесной машины с двигателем внутреннего сгорания, изложенный, например, в работе [1], в результате получим ТДХ ШВС.

Как видно из рисунка 4, скоростной диапазон в пределах работы с одним из вариантов числа пар полюсов либо недостаточен для нормальной эксплуатации ШВС по величине динамического фактора, либо очень узкий по диапазону возможных скоростей движения, что ухудшает эксплуатационные качества ШВС. При этом участок $0-n_{\text{Мкрит}}$ на скоростной характеристике ЭЛД не должен быть рабочим в течение периода, большего некоторого малого отрезка времени, из-за возникновения больших токов в обмотках электродвигателя [4]. Это периоды трогания-разгона или значительной перегрузки ЭЛД. В связи с изложенным, возможно за ЭЛД установить в трансмиссию фрикцион с двумя гидродожимными фрикционными муфтами (ГФМ), как показано на рисунке 5.

Такое техническое решение позволяет осуществлять плавное, без дерганий трогание ШВС с места [5] (как вариант, трогание с места с пробуксовкой обеих муфт, последующий разгон на одной муфте при отключенной второй, а также переключение ступеней фрикциона на ходу без разрыва потока мощности). Кроме того, за счет такого технического решения появляется возможность использовать две рабочие передачи и две скорости установившегося движения при каждой настройке числа пар полюсов в ЭЛД. Таким образом, оказывается возможным использовать шесть диапазонов рабочих скоростей, что существенно повышает динамическую гибкость и приспособляемость ШВС к изменяющимся дорожным условиям по ходу движения в условиях шахты. Такое решение привода колес позволяет приблизиться к поддержанию режимов работы ЭЛД ШВС в области механической характеристики с наибольшими значениями КПД (рисунок 2).

Еще одно достоинство такого решения привода состоит в возможности обеспечения проходимости встречающихся участков движения сферы планируемой эксплуатации ШВС в шахтах, например, с большими уклонами поверхностей или сопротивлением качению колес, хотя и на меньшей скорости.

Microsoft Excel - Расчет ТДХ ШВС 12.10.2014 шесть диап

Ход	Диапазон	Передача	Передачные числа		КПД транс-миссии	Скорость движения при n=0 об/мин	Скорость движения при n=150 об/мин	Скорость движения при n=300 об/мин	Скорость движения при n=450 об/мин	Скорость движения при n=600 об/мин	Скорость движения при n=750 об/мин
			Коробки радиальной	Трансмиссии							
I	1	1	1,2000	15,6000	0,876	0,000	0,512	1,023	1,535	2,046	2,558
		2	2,1000	32,7600	0,876	0,000	0,139	0,278	0,418	0,557	0,696

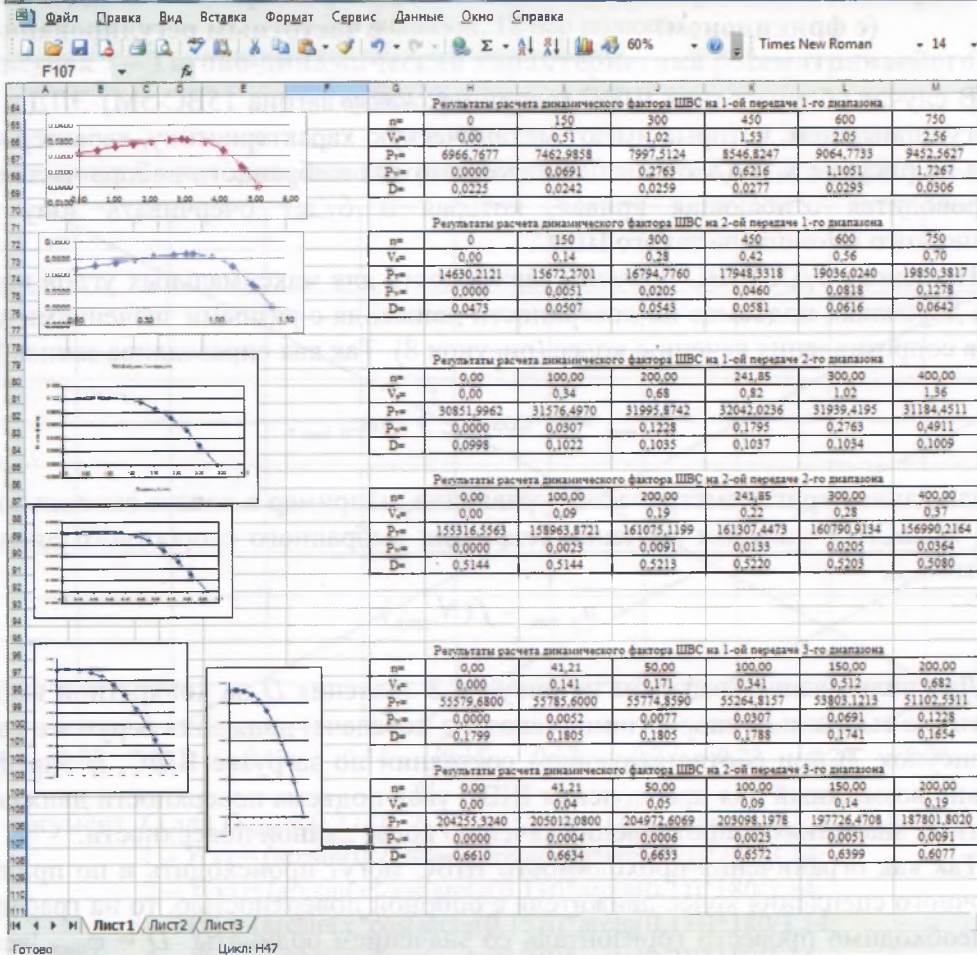


Рисунок 4 – Копия окон электронной таблицы с вариантом расчета ТДХ ШВС

При схеме привода колес ШВС (рисунок 5) его ТДХ имеет вид, показанный на рисунке 6. Как следует из рисунка 6, реализация шести рабочих скоростных диапазонов в ЭЛД в приводе колес ШВС существенно расширяет его эксплуатационную способность по скорости движения при достаточном динамическом тяговом потенциале при преодолении сопротивлений движению ШВС.

При изменении значений передаточного отношения зубчатых передач фрикциона (рисунок 5) по изменениям на графиках программированной электронной таблицы (рисунок 4) легко отслеживать влияние изменений параметров привода на динамический тяговый потенциал исследуемого ШВС.

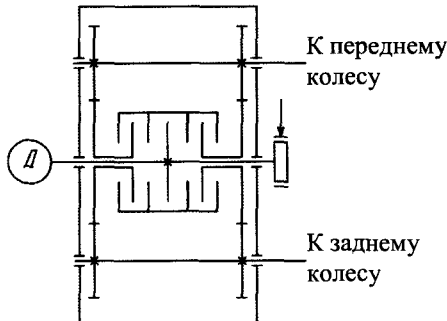


Рисунок 5 – Раздаточная коробка с ГФМ в приводе колес борта ШВС (с фрикционом)

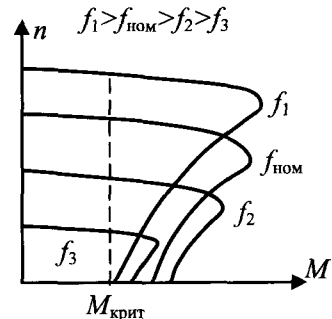


Рисунок 6 – Механическая характеристика ЭЛД ШВС с частотным регулированием

В случае оборудования ШВС (например, как у вагона 15ВС-5М) ЭЛД с частотным регулированием, которые имеют механическую характеристику, характер которой показан на рисунке 6, ТДХ строится аналогично для выбранного набора частот f , а затем проводится огибающая кривая, которая и будет очерчивать зону тягово-динамического потенциала такого ШВС.

На основе ТДХ ШВС получим зависимость для максимальных углов преодолеваемых дорожных подъемов на поверхности движения с разными значениями коэффициентов сопротивления качению колес (рисунок 8). Так как справедлива запись [5]

$$D_{j \max} = f_i \cdot \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{ij \max},$$

то, решая данное тригонометрическое уравнение, например в пакете символьной математики MathCAD, получим значение углов для выбранного скоростного диапазона с номером $N_{\text{перед}}$

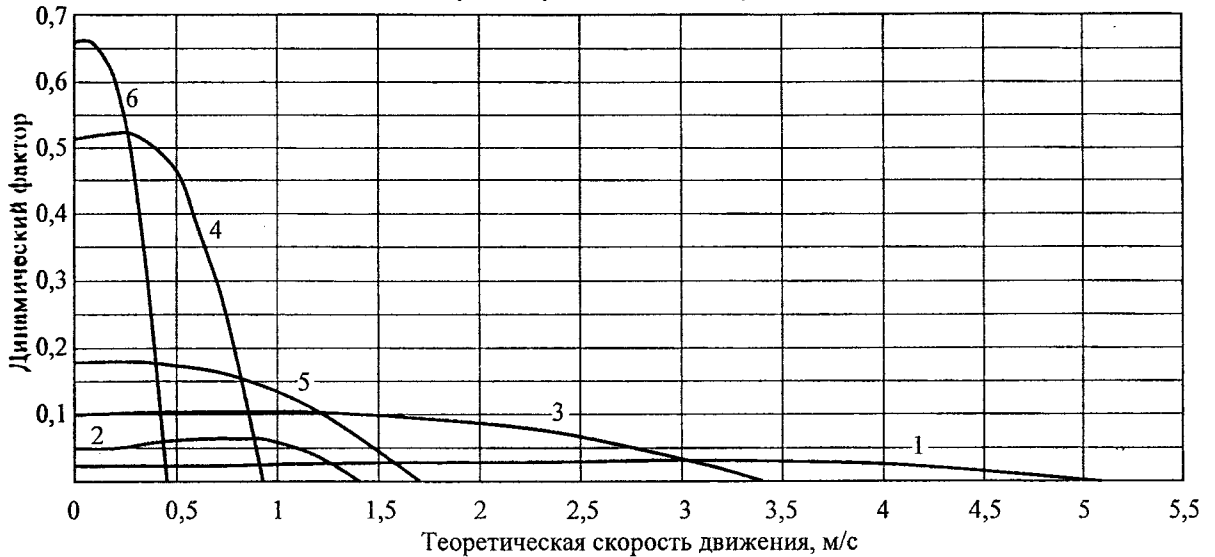
$$\alpha_{ij \max} = f(N_{\text{перед}}).$$

Для пользования графиком на рисунке 8 значения D на конкретной выбранной скорости (на выбранном скоростном диапазоне-передаче) движения берутся с графиков ТДХ (рисунок 7) при соответствующем состоянии по загрузке ШВС, и определяется предельно возможный для преодоления ШВС угол подъема поверхности движения при конкретных значениях сопротивления качению колес данной поверхности.

Так как ограничения проходимости ШВС могут происходить и по причине недостаточного сцепления колес движителя с опорной поверхностью, то на графике ТДХ ШВС необходимо провести горизонталь со значением ординаты $D = \varphi_{\max}$ величины коэффициента сцепления колес с поверхностью качения. Она может пересечь часть

кривых характеристики и будет отражать ограничение тягово-динамических свойств ШВС по сцеплению колес с поверхностью движения, то есть части кривых ТДХ над упомянутой горизонталью не смогут быть реализованы в данных условиях движения.

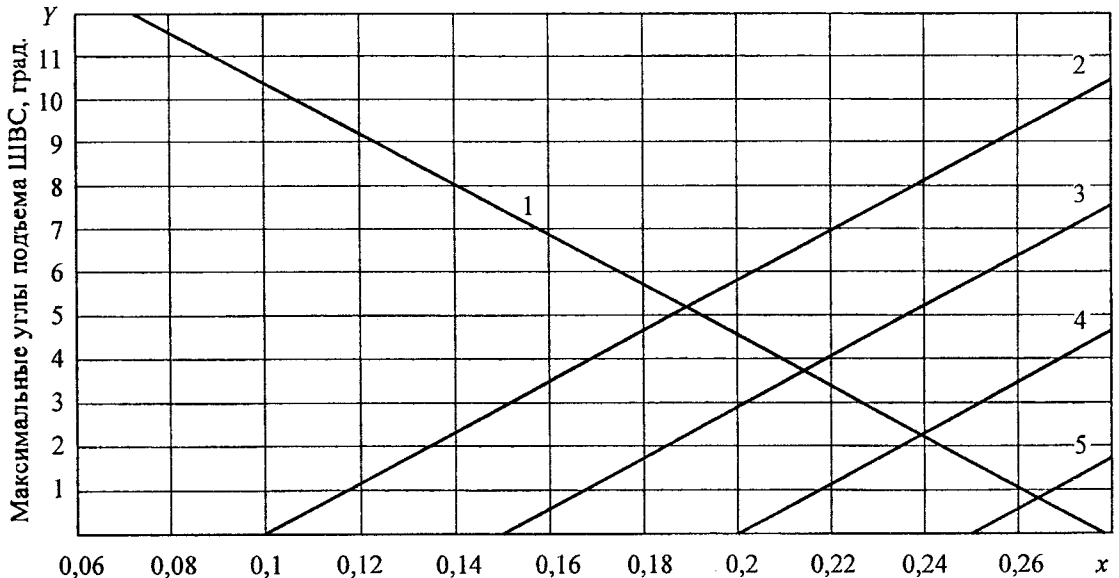
Вариант привода колес с двумя ГФМ



1 – 1-й диапазон, 4 пары полюсов; 2 – 2-й диапазон, 4 пары полюсов; 3 – 1-й диапазон, 6 пар полюсов; 4 – 2-й диапазон, 6 пар полюсов; 5 – 1-й диапазон, 12 пар полюсов; 6 – 2-й диапазон, 12 пар полюсов

Рисунок 7 – Тягово-динамическая характеристика рассматриваемого самоходного вагона

Диаграмма определения преодолеваемых углов подъема ШВС в различных дорожных условиях



1 – аргумент f_i (для $D_{j \max} = 0,278$); 2-5 – аргумент $D_{j \max}$ (для $f_i = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$)

$$1 - Y(x) = (\arcsin(0,278 \cdot \cos(\arctg(x))) \cdot \arctg(x)) \cdot 180/3,14;$$

$$2 - Y(x) = (\arcsin(x \cdot \cos(\arctg(0,1))) \cdot \arctg(0,1)) \cdot 180/3,14;$$

$$3 - Y(x) = (\arcsin(x \cdot \cos(\arctg(0,15))) \cdot \arctg(0,15)) \cdot 180/3,14;$$

$$4 - Y(x) = (\arcsin(x \cdot \cos(\arctg(0,2))) \cdot \arctg(0,2)) \cdot 180/3,14;$$

$$5 - Y(x) = (\arcsin(x \cdot \cos(\arctg(0,25))) \cdot \arctg(0,25)) \cdot 180/3,14$$

Рисунок 8 – Диаграмма D и α_{\max} для порожнего и груженого ШВС

Заключение

Таким образом, приведенные методические положения позволяют получить фактический числовой материал для проведения сравнительного анализа тягово-динамических свойств проектируемых ШВС с различными вариантами привода колес и использованного ЭЛД, с целью выбора рационального варианта на этапе решения задач функционального аспекта проектирования новой машины с требуемыми показателями эксплуатационных свойств.

Список использованных источников

1. Таяновский, Г.А. Построение тягово-динамической характеристики горной машины / Г.А. Таяновский, А.А. Язенков // Инновационные пути развития техники, технологий и инженерного обеспечения горнодобывающей промышленности Республики Беларусь: сб. науч. трудов / ФГДЭ, БНТУ. – Минск, 2011. – С. 97-101.
2. Москаленко, В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
3. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4/98. – С. 38-42.
4. Масандилов, Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л.Б. Масандилов, В.В. Москаленко. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
5. Модернизация и средства анализа привода колес шахтного самоходного вагона / Г.А. Таяновский [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 2. – С. 51-60.

Tayanovsky G.A., Basalai G.A., Matusovich E.V., Zagorovsky Yu.V.

Traction-dynamic characteristic of the shaft self-moving vehicle

For studying the developed draft proposals of various ways of improvement of the wheel drive of the shaft self-moving vehicle and also for the following selection of a rational scheme and wheel drive parameters are developed methodic regulations and the required program module in electronic worksheet technology. By using this module the calculations are made of the traction-dynamic characteristic of the shaft self-moving vehicle equipped with a variable number of ports for putting into wheel drives around the sides of the frictions with two transmissions.

Поступила в редакцию 12.11.2014г.