

А.Н. Коптовец, д-р техн. наук, Е.А. Коровяка, канд. техн. наук, П.А. Дьячков, В.В. Яворская (Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»), С.В. Самуся, канд. техн. наук (Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова).

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ШАХТНЫХ ПОЕЗДОВ

Введение. Исследования, выполненные на шахтном рельсовом транспорте [1], позволяют перейти от натурных тормозных и тяговых испытаний к вычислительному эксперименту. До настоящего времени не определены показатели, с помощью которых можно установить номинальные режимы торможения шахтного подвижного состава.

Цель работы – разработка вычислительного и блок-схемного алгоритмов моделирования тяги и движения шахтных поездов.

Математическая модель тяги и движения шахтных поездов.

При построении модели тяги и управляемого движения шахтного поезда его можно рассматривать как неизменяемую систему с одной степенью свободы, на которую действуют только внешние силы, приложенные к центру масс поезда в середине его длины и совпадающие с направлением движения поезда либо противоположны ему. Число степеней свободы системы определяется удерживающими связями. Ими являются сцепные устройства и рельсы. Сцепные устройства шахтных поездов (не во всех случаях) выполняют роль внутренних удерживающих связей, заставляющих локомотив и вагоны двигаться с одинаковой скоростью и ускорением, описывать одинаковые траектории.

Если пренебречь размерами поезда и рассматривать его движение как поступательное движение неизменяемой системы, то это позволяет в классической механике описать математически как движение системы в целом, т. е. материальной точки, в которой сосредоточена вся масса системы, приведенная к ее центру инерции. В результате в тяговых расчетах движение поезда будет представлено как движение материальной точки, расположенной в середине поезда.

Рельсы выполняют роль внешних удерживающих связей, которые заставляют поезд двигаться только в одном направлении вдоль рельсов. Поэтому для описания движения достаточно одного дифференциального уравнения.

Если внешние силы, которые совпадают с направлением движения поезда, приложены к одной точке, то их можно алгебраически складывать и рассматривать движение системы под действием результирующей силы. К числу внешних сил, определяющих движение поезда, относятся сила тяги, сила сопротивления движению и тормозная сила, которые для удобства тяговых расчетов можно привести к ободам колес локомотива и вагонов. Результирующая сила, отнесенная к 1 т массы поезда, является удельной.

Характеристики сил, действующие на подвижной состав шахтного рельсового транспорта, строят по результатам испытаний для стационарных режимов его работы при равномерной скорости движения. При смене режимов управления или внешней нагрузки не учитывают изменение величины сил при переходе от одного установившегося процесса к другому. Такие характеристики являются статическими и в тяговых расчетах их необходимо использовать в качестве априорной информации. Представить типовые динамические характеристики переходных процессов движения подвижного состава шахт не представляется возможным из-за сложности физической природы этих процессов и необходимым из-за ограничения скорости движения в эксплуатации до 3 м/с. Поэтому при изменении сил тяги, торможения или профиля пути в тяговых расчетах необходимо принимать скачкообразное изменение равнодействующей сил.

Если хотя бы одна из сил, действующих на систему, будет зависеть от скорости движения, то решить задачу о ее движении возможно только методом интегрирования дифференциального уравнения, которое должно быть линейным для возможности использования суперпозиции, т. е. результирующее движение системы равно сумме движений, возникающих под действием каждой силы в отдельности.

Поэтому для построения математической модели используем теорему об изменении кинетической энергии механической системы при некотором ее перемещении. Работа внутренних сил поезда на этом перемещении равна нулю, тогда согласно закону сохранения энергии принимая силы постоянными

$$dT = (F_k - W_k - B_T) dS, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия поезда; F_k – касательная сила тяги локомотива; W_k – общее сопротивление движению поезда; B_T – тормозная сила; S – путь, пройденный поездом.

В соответствии с теоремой Кенига кинетическая энергия поезда равна сумме кинетической энергии поступательного движения всей массы поезда со скоростью его центра инерции и суммы кинетических энергий вращения колесных пар, якорей двигателей и зубчатых передач вокруг своих центров инерции

$$T = m \frac{V^2}{2} + \sum I_{\text{КВ}} \frac{\omega_{\text{КВ}}^2}{2} + \sum I_{\text{КЛ}} \frac{\omega_{\text{КЛ}}^2}{2} + \sum I_{\text{Я}} \frac{\omega_{\text{Я}}^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса поезда; V – скорость поступательного движения поезда; $I_{\text{КВ}}$, $I_{\text{КЛ}}$, $I_{\text{Я}}$ – полярные моменты инерции соответственно колес и колесных пар вагонов, локомотива и якорей тяговых двигателей; $\omega_{\text{КВ}}$, $\omega_{\text{КЛ}}$, $\omega_{\text{Я}}$ – угловая скорость соответственно колес и колесных пар вагонов, локомотивов и якорей тяговых двигателей.

Выполним приведение вращающихся масс к поступательному движению, приняв звеном приведения колеса поезда. Условием эквивалентности вращающихся масс системы и приведенной массы является равенство их кинетических энергий

$$m_{\text{п}} \frac{V^2}{2} = m \frac{V^2}{2} + \sum I_{\text{КВ}} \frac{\omega_{\text{КВ}}^2}{2} + \sum I_{\text{КЛ}} \frac{\omega_{\text{КЛ}}^2}{2} + \sum I_{\text{Я}} \frac{\omega_{\text{Я}}^2}{2}, \quad (3)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса поезда, приведенная к поступательному движению.

Полярные моменты инерции вращающихся масс

$$I_{\text{КВ}} = m_{\text{КВ}} \rho_{\text{КВ}}^2, \quad I_{\text{КЛ}} = m_{\text{КЛ}} \rho_{\text{КЛ}}^2, \quad I_{\text{Я}} = m_{\text{Я}} \rho_{\text{Я}}^2,$$

где $m_{\text{КВ}}$, $m_{\text{КЛ}}$, $m_{\text{Я}}$ – соответственно массы вращающихся колес вагонов, колесных пар локомотива и якорей тяговых двигателей с зубчатой передачей.

Угловые скорости

$$\omega_{\text{КВ}} = \frac{V}{R_{\text{КВ}}}, \quad \omega_{\text{КЛ}} = \frac{V}{R_{\text{КЛ}}}, \quad \omega_{\text{Я}} = \frac{\mu V}{R_{\text{КЛ}}},$$

где V – скорость поступательного движения; $R_{\text{КВ}}$, $R_{\text{КЛ}}$ – радиусы колес вагонов и локомотива соответственно; μ – передаточное число зубчатой передачи двигателя

$$\mu = \frac{\omega_{\text{Я}}}{\omega_{\text{КЛ}}}.$$

Тогда

$$m_{\text{п}} \frac{V^2}{2} = m \frac{V^2}{2} + \sum I_{\text{КВ}} \frac{V}{2R_{\text{КВ}}} + \sum I_{\text{КЛ}} \frac{V}{2R_{\text{КЛ}}} + \sum I_{\text{Я}} \frac{\mu^2 V}{2R_{\text{КЛ}}}$$

или

$$m_{\text{п}} = m + \sum m_{\text{КВ}} \frac{\rho^2}{R_{\text{КВ}}^2} + \sum m_{\text{КЛ}} \frac{\rho^2}{R_{\text{КЛ}}^2} + \sum m_{\text{Я}} \frac{\mu^2 \rho_{\text{Я}}^2}{2R_{\text{КЛ}}^2}. \quad (4)$$

Обозначим приведенную массу вращающихся частей $m_{\text{вр}}$, тогда приведенная масса поезда

$$m_{\text{п}} = m + m_{\text{вр}}.$$

Если

$$\frac{m_{\text{вр}}}{m} = \gamma,$$

то

$$m_{\text{п}} = m(1 + \gamma),$$

$$T = m(1 + \gamma) \frac{V^2}{2}.$$

Коэффициент инерции вращающихся масс поезда

$$\delta = 1 + \gamma,$$

а изменение кинетической энергии поезда на некотором перемещении

$$dT = m\delta \frac{dV^2}{2} = m\delta V dV,$$

с учетом выражения (1)

$$m\delta V dV = (F_k - W_k) dS. \quad (5)$$

Принимая, что

$$dS = V dt,$$

$$m = m_{л} + m_{с},$$

получим

$$(m_{л} + m_{с})\delta \frac{dV}{dt} = F_k - W_k,$$

где $m_{л}$, $m_{с}$ – масса локомотива и состава соответственно.

Тогда математическая модель (уравнение) движения поезда в режиме тяги

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_k - W_k}{(m_{л} + m_{с})\delta}. \quad (6)$$

Уравнение движения поезда в режиме торможения

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{(B_T + W_k)}{(m_{л} + m_{с})\delta}. \quad (7)$$

Для интегрирования уравнений (6) и (7) необходимо знать факторы, определяющие состояние (скорость, ускорение, путь и т.д.) и поведение (изменение переменных состояния в текущем времени) поезда в условиях эксплуатации. Для этого следует изучить зависимости сил F_k , W_k , B_T , определяющие его движение.

Для колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов тормозная сила поезда является линейной функцией скорости движения

$$B_T = A - BV,$$

где A , B – параметры, которые определяются в процессе исследования корреляционных связей и дискриминантным анализом регрессионной зависимости силы (коэффициента) трения тормозных колодок. Для шахтных локомотивов применяют однотипные тормозные колодки.

Нормы массы поездов и скорости их движения определяют по нормативно-расчетным значениям касательной силы тяги F_k , расчетной скорости V_p и тяговым характеристикам $F_k(V)$ локомотива, полученным опытным путем [2, 3].

Для аппроксимации графиков использовалась программа GetData Graph Digitizer. Основные ее возможности: поддержка графических форматов TIFF, JPEG, BMP и PCX; два алгоритма для автоматической оцифровки; способность менять порядок точек в линии; берегаемость рабочего пространство, что позволяет сохранить текущую работу и вернуться к ней позже; копирование полученных данных в буфер обмена.

Процесс оцифровки состоит из четырех шагов: открыть график, установить масштаб (систему координат), оцифровать (автоматически или вручную), скопировать данные в буфер обмена, или экспортировать в TXT, XLS, XML, DXF или EPS файл.

Определение массы поезда по силе сцепления ходовых колес локомотива с рельсами.

Допустимая по сцеплению масса поезда при трогании:

$$m_{п} = \frac{1000m_{л}\psi}{(w_0 + w_{зр} + w_{кр} \pm i + 108a_0)}, \quad (8)$$

где i – уклон пути; w_0 – основное удельное сопротивление движению; $w_{зр}$ и $w_{кр}$ – дополнительное удельное сопротивление соответственно при трогании и от кривой; a_0 – расчетное ускорение при трогании.

При установившемся движении допустимая масса поезда

$$m_{п} = \frac{1000m_{л}\psi}{(w_0 \pm i)}. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) знак “плюс” относится к случаю движения на подъем, “минус” – на спуск.

Определение массы поезда по емкости тяговой аккумуляторной батареи электровоза.
 Максимально допустимый разрядный ток тяговой батареи аккумуляторов (А),

$$I_{\text{max.бат}} = \frac{C_n K_6 K_{\text{реж}}}{t_p^H}, \quad (10)$$

где C_n – номинальная электрическая емкость тяговой батареи, А·ч; $K_6 = 0,8 \dots 1,1$ – коэффициент, который характеризует фактическое состояние тяговой батареи (отношение фактической емкости к номинальной); $K_{\text{реж}} = 1,5$ – коэффициент предельного режима разряда; t_p^H – время номинального разрядного режима, ч.

Величина $K_{\text{реж}}$ не имеет нормируемого значения. Его рекомендуется принимать, руководствуясь тем, что разряд батареи токами, которые значительно превышают номинальное значение, приводит к снижению емкости батареи, разрядного напряжения и срока службы.

Для тяговых батарей аккумуляторов шахтных электровозов номинальными являются трех- или пятичасовые разрядные режимы, которые отвечают принятию разных конструктивных параметров аккумуляторов во время их проектирования.

Максимальная по тяговой батарее сила тока тягового двигателя:
 – при последовательном соединении двигателей электровоза

$$I_{\text{max.дв}} = I_{\text{max.бат}};$$

– при параллельном

$$I_{\text{max.дв}} = \frac{I_{\text{max.бат}}}{n_{\text{дв}}}.$$

Масса поезда, допустимая по разрядному току батареи при постоянном его движении на среднем подъеме i_c , т:

$$m_n = n_{\text{дв}} \frac{F_{\text{д.бат}}}{g(w_0 + i_c)},$$

где $F_{\text{д.бат}}$ – касательная сила тяги электровоза, допустимая по разрядному току батареи.

Предельное количество порожних вагонов в составе

$$Z_n = \frac{(m_{\text{п.п}} - m_{\text{л}})}{m_0 + C_M m},$$

где C_M – коэффициент, который учитывает перевозку в составе материалов и не разгруженного остатка горной массы, $C_M = 0,10 \dots 0,15$.

Предельное количество груженых вагонов в составе и массы порожнего и груженого поездов соответственно:

$$Z_e = \frac{(m_{\text{п.в}} - m_{\text{л}})}{m_0 + m},$$

$$m_{\text{п.п}} = Z_{\text{п}}(m_0 + C_M m) + m_{\text{л}},$$

$$m_{\text{п.в}} = Z_{\text{в}}(m_0 + m) + m_{\text{л}}.$$

Определение массы поезда по мощности тяговых двигателей.

Проверка считается приемлемой при условии, если

$$I_{\text{дл}} \geq I_e, \quad (11)$$

где $I_{\text{дл}}$ – длительный ток двигателя, по тяговой характеристике электровоза; I_e – эквивалентный ток двигателя за рейс (А),

$$I_e = \gamma \sqrt{\frac{\sum(I^2 t)}{T}}, \quad (12)$$

где γ – коэффициент, который учитывает дополнительный нагрев двигателей при выполнении электрово-
зом конечных операций (согласно опытным данным для угольных шахт $\gamma = 1,4$ – на расстояние транс-
портирования до 1 км, $\gamma = 1,25$ – на расстояние 1...2 км, $\gamma = 1,15$ – на расстояние более 2 км, для рудных
шахт $\gamma = 1,4 \dots 1,5$); I – ток нагрузки двигателя, А; t – время движения при токе нагрузки, мин; T – время
рейса, мин.

Силу тока определяют в соответствии с электромеханическими характеристиками по значениям си-
лы тяги, рассчитанной для среднего (средневзвешенного) уклона пути маршрута; если маршрут разбит на
несколько участков, то по силе тяги, которая отвечает среднему уклону каждого участка маршрута. При
наличии самокатных спусков, где применяют электродинамическое торможение, учитывают ток, соот-
ветствующий этому режиму работы двигателей.

Касательная сила тяги, реализованная двигателем на данном участке маршрута, Н:
– для порожнякового направления

$$F_{xi} = gm_{п.п} \frac{w_{о.п} + i_{ci}}{n_{дв}}; \quad (13)$$

– для грузового направления

$$F_{pi} = gm_{п.в} \frac{w_{о.н} - i_{ci}}{n_{дв}}, \quad (14)$$

где $n_{дв}$ – количество тяговых двигателей электровоза.

Время (мин) движения поезда по участку маршрута длиной l_i (м) со скоростью V_i (м/с) определяют,
пользуясь приближенным методом “постоянных скоростей”:

$$t_i = \frac{l_i}{60K_{ш}V_i}, \quad (15)$$

где $K_c = 0,75 \dots 0,9$ – коэффициент скорости, который учитывает периоды пуска и торможения поезда.

Длительность рейса, мин:

$$T_p = \frac{\sum l_i}{60K_c V_{xi}} + \frac{\sum l_i}{60K_c V_{pi}} + \Theta, \quad (16)$$

где l_i – длина i -го элемента маршрута, м; $\Theta_{ц}$ – длительность пауз за цикл; V_{xi} и V_{pi} – скорость движения
поезда на этом элементе соответственно при холостом и рабочем ходе, м/с.

Если проверка по формуле (11) неудовлетворительна, необходимо уменьшить количество вагонов и
повторить расчет.

Определение массы поезда по мощности тормозной системы локомотива.

Допустимая по торможению масса груженого поезда при заданной скорости движения V_n^3 , по тре-
бованиям эксплуатации V_n , по тяговой характеристике двигателя $V_{дв}$ или номинальная по длительному
току нагрузки $V_{дл}$:

$$m_{п.в} = \frac{B_k}{g \left(\frac{54V_n^2}{l_T^H - V_n t_n} + i_p - w_{о.н} \right)}, \quad (17)$$

где $w_{о.н}$ – основное удельное сопротивление движению груженого поезда; B_k – суммарная тормозная
сила, реализованная локомотивом (поездом) при экстренном торможении; V_n – скорость поезда в началь-
ный момент торможения; t_n – время подготовки тормозов к действию.

Допустимая скорость движения

$$V_{доп} = \sqrt{2a_T l_T^H + (a_T t_n)^2} - a_T t_n, \quad (18)$$

где a_T – замедление поезда

$$a_T = \frac{1}{108} \left(\frac{B_K}{gm_{п.в}} + w_K \right) = 0,01 \left(\frac{B_K}{gm_{п.в}} + w_{o.н} - i_P \right). \quad (19)$$

Количество единиц подвижного состава по сцеплению локомотива определяется аналитически через допустимую массу поезда (8, 9), что в схеме программы отражается символами $m_n = m(\psi)$, $z_1 = z(\psi)$.

Методика тягового расчета не дает возможность определить массу поезда по условиям мощности тяговых двигателей электровоза и тормозных усилий локомотива (за исключением одного случая, который мы используем). Поэтому в схеме программы выполняем проверку z_1 при условии нагрева тяговых двигателей электровоза токами нагрузки, которые согласно электромеханической характеристике двигателя пропорциональны силам тяги. Для этого используем вычислительный цикл

$$z_2 = z_1, \\ z_2 = z_2 - 1,$$

операции проверки (13), (14), (15), (16), (12), (11).

При этом для сравнения используются эквивалентный и номинальный токи нагрузки двигателя.

При моделировании торможения вычислительный цикл $z_2 = z_2 - 1$ использовать нет смысла. Для этого необходимо вычислять массу поезда при заданной скорости начала торможения V_n^3

При составлении блок-схемы программы (рис. 1) исходили из того, что проверку массы поезда при торможении следует выполнять последней. Это позволяет получить допустимую скорость движения для окончательно принятой массы поезда.

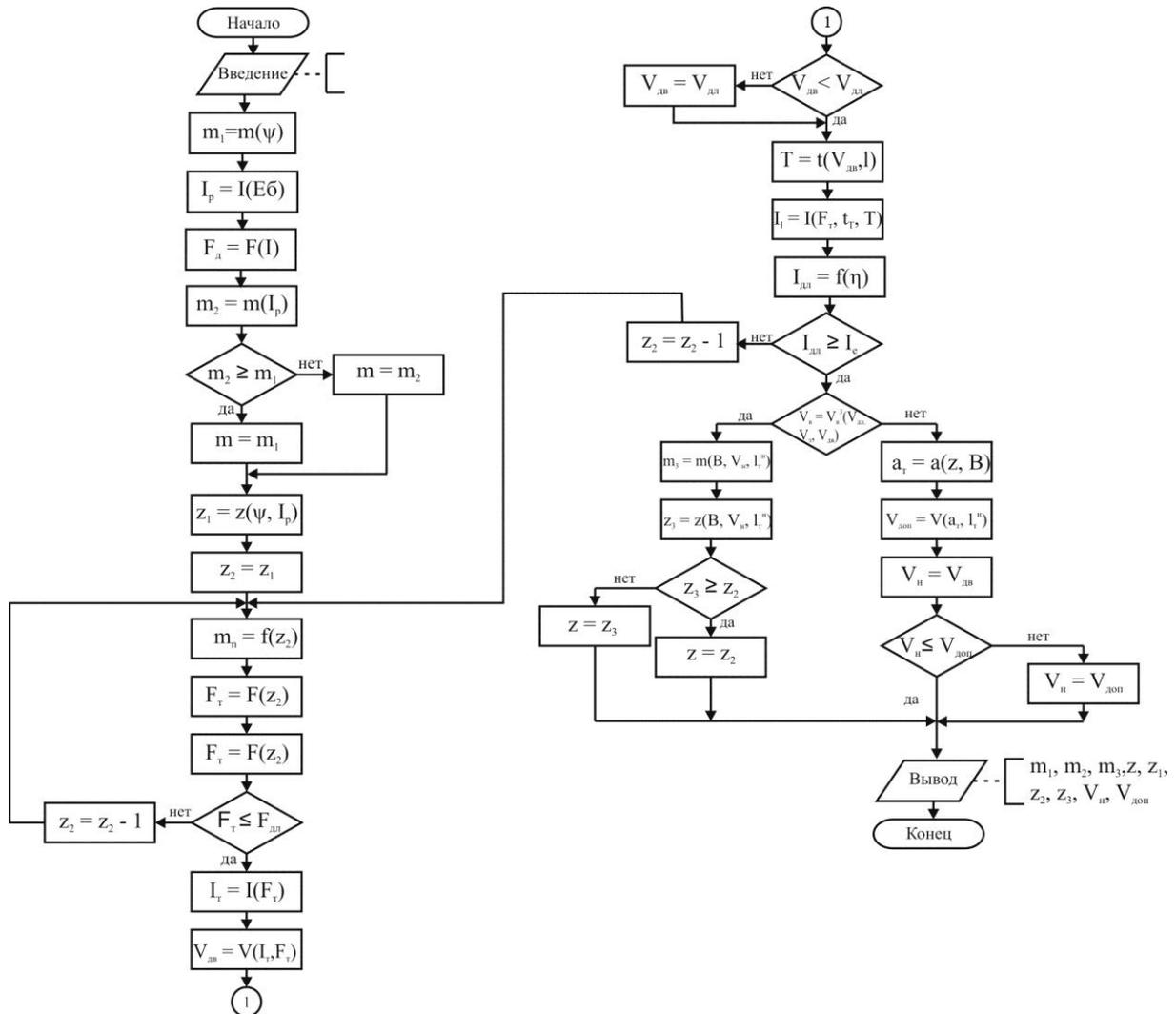


Рис. 1. Блок-схема программы расчета электровозной откатки

Выводы. Тормозное нажатие номинального режима для колесно-кошачьего тормоза шахтных локомотивов составляет 7 кН. Вычислительный алгоритм моделирования тяги и движения шахтных поездов имеет оптимальную последовательность, так как при этом необходимо последовательным расчетом решать обе задачи теории тяги: 1) определить массу поезда для заданного плана и профиля пути; 2) для заданной массы поезда найти управляемое движение при соблюдении скорости движения или длины тормозного пути. Показатели назначения шахтного подвижного состава по эффективности тяги и торможения не равны при номинальной скорости движения поезда. Технический уровень подвижного состава по эффективности торможения ниже, чем по тяге. Проектирование серийных электровозов выполнено не верно. При увеличении сцепной массы электровозов необходимо повышать мощность тяговых двигателей (коэффициент тяги), емкость аккумуляторных батарей и мощность тормозного оборудования соответственно, чтобы не было ограничений массы поезда.

Список литературы

1. Коптовец А.Н. Развитие научных основ разработки тормозных систем подвижного состава шахтного рельсового транспорта высокого технического уровня [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.06: защищена 03.04.2013 : затв. 04.07.2013 / Коптовец Александр Николаевич; Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т». – Д., 2013. – 401 с. – Библиогр.: с. 202–213. – 0513u000475
2. Справочник по шахтному транспорту / под ред. Г.Я. Пейсаховича и И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1977. – 624 с.
3. Транспорт шахтный локомотивный. Перевозка людей и груза в выработках с уклоном пути от 0,005 до 0,050. Общие технические требования: СОУ 10.1.00185790.004:2006. . – [Чинний від 2006-08-01]. – Д. : Стандарт Минуглепрома Украины., 2006. – 36 с. – (Стандарт Министерства угольной промышленности Украины)

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Мецержаковим Л.І.

УДК 621.83.062.1: 622.625.28

И.А. Таран, д-р. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»)

С.В. Самуся, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕССТУПЕНЧАТЫХ ТРАНСМИССИЙ ШАХТНЫХ ДИЗЕЛЕВАЗОВ НА БАЗЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Введение. Для шахтных дизелевозов проблема обоснования типа бесступенчатой трансмиссии (гидрообъемно-механическая или электрическая), выбора критериев для их сравнения, рациональной структурной схемы и наиболее рациональных конструктивных параметров, множества возможных скоростных диапазонов, передаточных чисел на каждом из них с точки зрения наилучшей тяговой динамики и энергетических характеристик с учетом стохастического распределения эксплуатационных скоростей является весьма актуальной и сдерживающей дальнейшее развитие шахтного транспорта в целом.

Традиционно для каждой схемы трансмиссии (структура, качественные и количественные характеристики ее базовых элементов) в составе транспортного средства необходимо составлять математическую модель для последующего подробного анализа кинематических, силовых и энергетических параметров трансмиссии с учетом технологических процессов, выполняемых машиной. Любые конструктивные изменения в заданной кинематической схеме трансмиссии, которые особенно характерны в периоды её разработки или модернизации, требуют соответствующей перестройки структуры, математической модели и решения практической задачи. Это приводит к дополнительным затратам интеллектуального труда, материальных средств и времени. Построение произвольных структурных схем ступенчатой и бесступенчатой трансмиссий с параллельным автоматизированным развитием – генерацией их математических моделей [1, 2] существенно ускоряет этот процесс, позволяет синтезировать огромное их число и одновременно выявить среди них наилучший вариант.

Анализ последних исследований и публикаций. Перераспределение потоков мощности в двухпоточных трансмиссиях преследует основную цель – получение более высокого КПД, причем именно в области максимальной производительности на тяговом и транспортном диапазонах. Для этого необходимо обеспечить такие конструктивные параметры элементов трансмиссии, при которых максимальная доля мощности передается через механическую ветвь с высоким КПД [3].

Для выбора конструктивных параметров в работах [3, 4] исследовано соотношение мощностей в параллельных ветвях бесступенчатой двухпоточной трансмиссии *Fendt-Vario* и были сделаны следующие