

Рябко К.А.

ГОУ ВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (Донецк)

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ШАХТНОГО ПОДВЕСНОГО МОНОРЕЛЬСОВОГО ЛОКОМОТИВА НА АККУМУЛЯТОРНОЙ ТЯГЕ

В настоящее время все более широкое применение в транспортных системах горных предприятий находят подвесные монорельсовые локомотивы на аккумуляторной тяге. Эффективность их функционирования в значительной степени зависит от качества оценки, обоснования параметров и режимов работы тяговых средств. Выполнять оценку данных параметров целесообразно по функциональной модели работы. Разработка модели позволит определить функциональные связи между элементами электрического привода и системы управления шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге.

***Ключевые слова:** шахтный подвесной монорельсовый локомотив, функциональная модель, аккумуляторная батарея, электрический привод, система управления, звенья, входные и выходные параметры.*

Постановка проблемы

В настоящее время все более широкое применение в транспортных системах горных предприятий находят подвесные монорельсовые локомотивы на аккумуляторной тяге. Эффективность их функционирования в значительной степени зависит от качества оценки, обоснования параметров и режимов работы тяговых средств [1-5]. Выполнять оценку данных параметров целесообразно по функциональной модели работы.

Анализ последних исследований и публикаций

Как показал анализ публикаций, данного рода модели либо отсутствуют, либо дают косвенное представление о параметрах и режимах работы тягового электропривода аккумуляторного монорельсового локомотива [6-11].

Применяемые методы построения имитационных моделей требуют значительных затрат труда и времени высококвалифицированных инженеров и программистов [12-14]. По этой причине полученные модели при проектировании шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге, как правило, недоступны широкому кругу практиков и в большинстве случаев используются для решения ограниченного круга задач.

Цель (задачи) исследования

Разработать функциональную модель работы шахтного подвесного монорельсового локомо-

тива на аккумуляторной тяге. Определить уровни детализации полученной модели, сгруппировать функции элементов. Используя комплексный подход, определить функциональные связи между элементами электрического привода и системой управления, а также привести ограничения для фазовых переменных звеньев функциональной модели работы шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге.

Основной материал исследования

Шахтный подвесной монорельсовый локомотив на аккумуляторной тяге представляет собой сложную систему, состоящую из множества различных элементов, которые в процессе работы тесно взаимодействуют друг с другом, оказывая взаимное влияние. К таким элементам можно отнести аккумуляторную батарею, систему управления, преобразователь электрической энергии, устройства реализации силы тяги и др. Функциональная модель шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге должна отражать как его структуру, так и взаимодействие ее элементов. Степень детализации моделирования может определяться в зависимости от поставленной задачи.

Учитывая сложную иерархическую структуру шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге, при разработке их функциональных моделей следует выделить следующие уровни детализации, таблица 1. На

метауровне локомотив рассматривается как тяговое средство транспортной системы, выполняющее обслуживание входящего потока заявок на перевозку грузов и людей по горным выработкам. На макроуровне выполняется моделирование процесса функционирования тягового привода и системы управления. На микроуровне рассматриваются отдельные элементы локомо-

тива как подсистемы, например, подсистема управления как отдельная САУ, тяговый двигатель как электромеханический преобразователь энергии и т.д. Функции элементов модели также целесообразно разделить на группы [15]:

- целевая функция ЦФ;
- основные функции ОФ;
- функции отдельных элементов ФОЭ.

Табл. 1. Уровни детализации функциональной модели работы шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге

Уровень модели	Функции	Элемент	Состав функций
Метауровень	ЦФ1	Локомотив	Тяга несамоходных подвешных монорельсовых экипажей с целью перевозки грузов и людей по горным выработкам
Макроуровень	ОФ1	Тяговый электрический привод	Преобразование электрической энергии в механическую с целью реализации силы тяги
	ОФ2	Пассивные и активные системы безопасности	Обеспечение необходимой безопасности движения
	ОФ3	Тяговый привод, система управления, тормозные устройства	Изменение и регулирование режимов работы локомотива
Микроуровень	ФОЭ1	Аккумуляторная батарея	Циклическое накопление энергии и автономное электропитание тягового привода и вспомогательных систем
	ФОЭ2	Статический преобразователь	Преобразование рода тока, напряжения и частоты. Питание тяговых электродвигателей
	ФОЭ3	Тяговый электродвигатель	Электромеханическое преобразование электрической энергии
	ФОЭ4	Механический редуктор	Передача мощности вращением, редукция частоты и вращающего момента
	ФОЭ5	Приводные колеса	Реализация касательной силы тяги, преобразование механической энергии вращения в кинетическую энергию движения поезда
	ФОЭ6	Устройства измерения и контроля	Получение значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Контроль изменения параметров работы систем локомотива. Селекция и формирование сигналов
	ФОЭ7	Система управления	Формирование управляющих воздействий. Реализация принципа управления. Сбор данных о состоянии локомотива. Контроль отклонения эталонных значений регулируемых величин. Защитные функции
	ФОЭ8	Система торможения	Снижение скорости движения или остановка локомотива

Важным требованием к разрабатываемой функциональной модели шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге является универсальность, что предполагает возможность ее дальнейшего использования для решения широкого круга научно-прикладных задач. Указанные задачи, как правило, будут направлены на повышение эффективности работы шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге.

Одним из решений данной проблемы является модульная организация функциональной модели работы на макроуровне. Такой подход позволяет упростить синтез моделей, обобщить параметры и режимы работы шахтных локомотивов на аккумуляторной тяге, что сделает их доступными широкому кругу инженерно-технических работников транспортных систем горных предприятий.

Для решения задачи построения функциональной модели работы шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге целесообразно использовать комплексный подход, который связывает между собой множество возможных решений R [12...14], как совокупность подмножеств технических характеристик локомотива, показателей эксплуатации и стоимостных показателей:

$$R = \{R_i\} = \{R_1, R_2, R_3\},$$

где R_1 – подмножество технических характери-

стик шахтного монорельсового локомотива; R_2 – подмножество показателей эксплуатации; R_3 – подмножество стоимостных показателей.

На сегодняшний день в эксплуатации находятся несколько вариантов шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге. На данных локомотивах применяются различные варианты схем и элементов тягового электрического привода [1-4, 16]. Исходя из анализа тяговых приводов, предлагается следующая обобщенная функциональная модель работы шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге (рис. 1).

Разработанная модель позволяет определить функциональные связи между элементами электрического привода и системы управления шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. В отличие от других моделей [17, 18] приведенная модель учитывает не только технические, но и стоимостные показатели элементов тяговой передачи шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. В основе разработанной модели лежит наиболее распространенный тип электрического привода шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. Характерной особенностью разработанной модели является ее универсальность, так как она учитывает параметры работы тяговой передачи, как с электродвигателями постоянного тока, так и асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

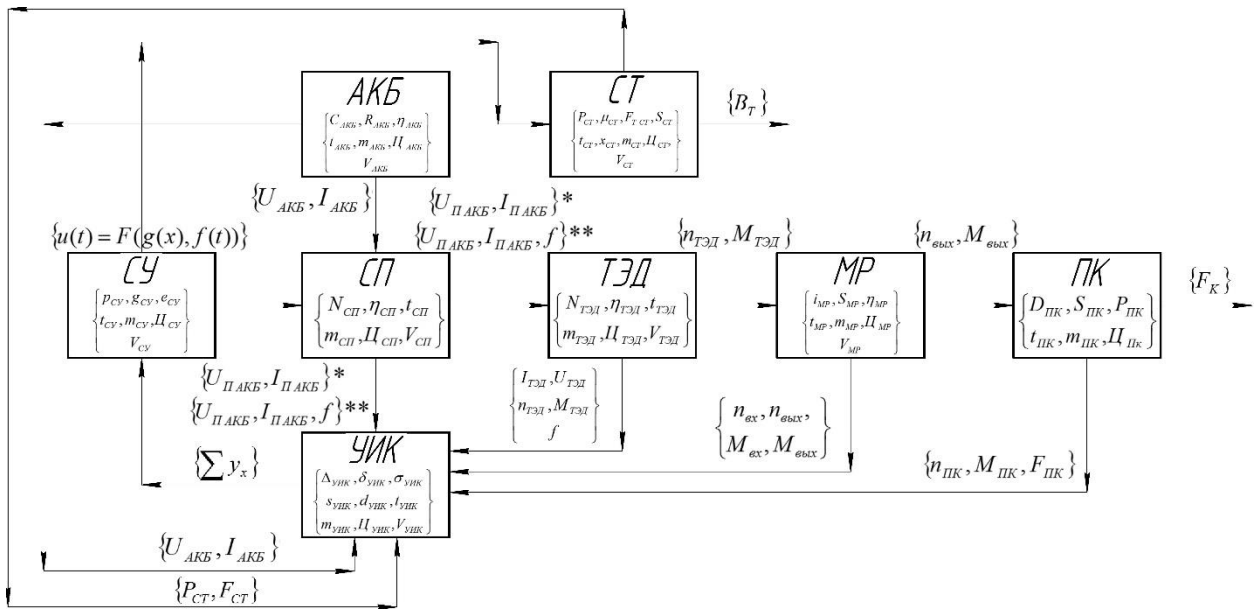


Рис. 1. Функциональная модель работы шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге

- * – для тягового электропривода с двигателями постоянного тока,
- ** – для тягового электропривода с двигателями переменного тока

Рассмотрим параметры каждого звена функциональной модели и дадим описание взаимосвязей между отдельными элементами тягового электрического привода шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге.

Для звена аккумуляторная батарея (АКБ) учитываются следующие внутренние параметры АКБ:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{АКБ}, R_{АКБ}, \eta_{АКБ} \\ t_{АКБ}, m_{АКБ}, \Pi_{АКБ} \\ V_{АКБ} \end{array} \right\},$$

где $C_{АКБ}$ – емкость АКБ, А·ч; $R_{АКБ}$ – внутреннее сопротивление АКБ, Ом; $\eta_{АКБ}$ – коэффициент полезного действия АКБ; $t_{АКБ}$ – температура АКБ, °С; $m_{АКБ}$ – масса АКБ, кг; $V_{АКБ}$ – объем АКБ, м³; $\Pi_{АКБ}$ – стоимость АКБ, руб.

Выходные параметры АКБ и входные для статического преобразователя и устройств измерения и контроля:

$$\{U_{АКБ}, I_{АКБ}\},$$

где $U_{АКБ}$ – напряжение аккумуляторной батареи, В; $I_{АКБ}$ – ток аккумуляторной батареи, А.

Для звена статический преобразователь электрической энергии (СП) в функциональной модели принимаются следующие внутренние параметры:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{СП}, \eta_{СП}, t_{СП} \\ m_{СП}, \Pi_{СП}, V_{СП} \end{array} \right\},$$

где $N_{СП}$ – электрическая мощность СП, Вт; $\eta_{СП}$ – коэффициент полезного действия СП; $t_{СП}$ – температура СП, °С; $m_{СП}$ – масса СП, кг; $V_{СП}$ – объем СП, м³; $\Pi_{СП}$ – стоимость СП, руб.

Из звена СП выходные параметры и соответственно входные для тягового электродвигателя:

– постоянного тока $\{U_{П АКБ}, I_{П АКБ}\}^*$;

– асинхронного или синхронного переменного тока $\{U_{П АКБ}, I_{П АКБ}, f\}^{**}$,

где $U_{П АКБ}$ – потребляемое напряжение от АКБ, В; $I_{П АКБ}$ – потребляемый ток от АКБ, А; f – частота тока на выходе из СП, Гц.

Принимаем следующие внутренние параметры для звена тяговый электродвигатель (ТЭД):

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{ТЭД}, \eta_{ТЭД}, t_{ТЭД} \\ m_{ТЭД}, \Pi_{ТЭД}, V_{ТЭД} \end{array} \right\},$$

где $N_{ТЭД}$ – электрическая мощность ТЭД, Вт; $\eta_{ТЭД}$ – коэффициент полезного действия ТЭД; $t_{ТЭД}$ – температура ТЭД, °С; $m_{ТЭД}$ – масса ТЭД, кг; $V_{СП}$ – объем ТЭД, м³; $\Pi_{СП}$ – стоимость ТЭД, руб.

Запишем выходные параметры звена ТЭД для устройств измерения и контроля:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ТЭД}, U_{ТЭД} \\ n_{ТЭД}, M_{ТЭД} \\ f \end{array} \right\},$$

где $I_{ТЭД}$ – электрическая мощность ТЭД, Вт; $U_{ТЭД}$ – напряжение на зажимах ТЭД, В; $n_{ТЭД}$ – частота вращения вала ротора (якоря) ТЭД, с⁻¹; $M_{ТЭД}$ – момент на валу ТЭД, Н·м; f – частота питающего напряжения ТЭД для двигателей переменного тока, Гц (в случае применения двигателя постоянного тока, фазовая переменная f исключается из совокупности подмножеств).

Выходные параметры звена ТЭД и, соответственно, входные для механического редуктора:

$$\{n_{ТЭД}, M_{ТЭД}\}.$$

Запишем внутренние параметры для звена механический редуктор (МР):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{МР}, S_{МР}, \eta_{МР} \\ t_{МР}, m_{МР}, \Pi_{МР} \\ V_{МР} \end{array} \right\},$$

где $i_{МР}$ – передаточное отношение МР; $S_{МР}$ – запас прочности МР; $\eta_{МР}$ – коэффициент полезного действия МР; $t_{МР}$ – температура МР, °С; $m_{МР}$ – масса МР, кг; $V_{МР}$ – объем МР, м³; $\Pi_{МР}$ – стоимость МР, руб.

Выходные параметры МР для устройств измерения и контроля:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{вх}, n_{вых} \\ M_{вх}, M_{вых} \end{array} \right\},$$

где $n_{вх}$ – частота вращения на входном валу МР, с⁻¹; $n_{вых}$ – частота вращения на выходном валу

MP, c⁻¹; M_{вх} – вращающий момент на входном валу MP, Н·м; M_{вых} – вращающий момент на выходном валу MP, Н·м.

Выходные параметры MP и соответственно входные для приводных колес:

$$\{n_{\text{вых}}, M_{\text{вых}}\}.$$

Принимаем следующие внутренние параметры для звена приводные колеса (ПК):

$$\left\{ \begin{matrix} D_{\text{ПК}}, S_{\text{ПК}}, P_{\text{ПК}} \\ t_{\text{ПК}}, m_{\text{ПК}}, Ц_{\text{ПК}} \end{matrix} \right\},$$

где D_{ПК} – диаметр ПК, м; S_{ПК} – запас прочности ПК; P_{ПК} – сила прижатия ПК к монорельсу, Н; t_{ПК} – температура ПК, °С; m_{ПК} – масса ПК, кг; Ц_{ПК} – стоимость ПК, руб.

Целевым выходным параметром звена ПК является множество значений фазовой переменной, сила тяги:

$$\{F_K\},$$

где F_K – касательная сила ПК, Н.

Выходные параметры ПК для устройств измерения и контроля:

$$\{n_{\text{ПК}}, M_{\text{ПК}}, F_{\text{ПК}}\},$$

где n_{ПК} – частота вращения ПК, c⁻¹; M_{ПК} – вращающий момент на ПК, Н·м; F_{ПК} – вращающий момент ПК, Н.

Запишем внутренние параметры для звена, устройства измерения и контроля (УИК):

$$\left\{ \begin{matrix} \Delta_{\text{УИК}}, \delta_{\text{УИК}}, \sigma_{\text{УИК}} \\ s_{\text{УИК}}, d_{\text{УИК}}, t_{\text{УИК}} \\ m_{\text{УИК}}, Ц_{\text{УИК}}, V_{\text{УИК}} \end{matrix} \right\},$$

где Δ_{УИК} – погрешность УИК; δ_{УИК} – класс точности УИК; σ_{УИК} – диапазон измерений УИК; s_{УИК} – чувствительность УИК; d_{УИК} – стабильность УИК; t_{УИК} – температура УИК, °С; m_{УИК} – масса УИК, кг; V_{УИК} – объем УИК, м³; Ц_{УИК} – стоимость УИК, руб.

Выходные параметры УИК и соответственно входные для системы управления:

$$\{\sum y_x\},$$

где ∑ y_x – селективный сигнал управляемых величин.

Принимаем следующие внутренние параметры для звена система управления (СУ):

$$\left\{ \begin{matrix} p_{\text{СУ}}, g_{\text{СУ}}, e_{\text{СУ}} \\ t_{\text{СУ}}, m_{\text{СУ}}, Ц_{\text{СУ}} \\ V_{\text{СУ}} \end{matrix} \right\},$$

где p_{СУ} – принципы управления СУ; g_{СУ} – эталонные значения регулируемых параметров; e_{СУ} – ошибка регулирования; t_{СУ} – температура СУ, °С; m_{СУ} – масса СУ, кг; Ц_{СУ} – стоимость СУ, руб. V_{СУ} – объем СУ, м³;

Выходные параметры СУ и соответственно входные для СП:

$$\{u(t) = F(g(x), f(t))\}.$$

Рассмотрим внутренние параметры системы торможения (СТ) шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге:

$$\left\{ \begin{matrix} P_{\text{СТ}}, \mu_{\text{СТ}}, F_{\text{ТСТ}}, S_{\text{СТ}} \\ t_{\text{СТ}}, x_{\text{СТ}}, m_{\text{СТ}}, Ц_{\text{СТ}} \\ V_{\text{СТ}} \end{matrix} \right\},$$

где P_{СТ} – давление в СТ, Па; μ_{СТ} – коэффициент трения тормозных колодок СТ; F_{ТСТ} – сила трения фрикционных поверхностей тормоза, Н; S_{СТ} – запас прочности СТ; t_{СТ} – температура СТ, °С; x_{СТ} – допустимые размеры тормозных колодок и других элементов СТ, м; m_{СТ} – масса СТ, кг; Ц_{СТ} – стоимость СТ, руб. V_{СТ} – объем СТ, м³;

Выходные параметры СТ для звена УИК:

$$\{P_{\text{СТ}}, F_{\text{ТСТ}}\}.$$

Соответственно целевым выходным параметром СТ будет множество значений фазовой переменной, сила торможения:

$$\{B_T\}.$$

Следовательно, для фазовых переменных звеньев функциональной модели работы шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге целесообразно привести ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \max C_{AKB} \geq C_{AKB} \geq \min C_{AKB}, \max R_{AKB} \geq R_{AKB} \geq \min R_{AKB}, \max \eta_{AKB} \geq \eta_{AKB} \geq \min \eta_{AKB}, \\
 \max t_{AKB} \geq t_{AKB} \geq \min t_{AKB}, \max m_{AKB} \geq m_{AKB} \geq \min m_{AKB}, \max \zeta_{AKB} \geq \zeta_{AKB} \geq \min \zeta_{AKB}, \\
 \max V_{AKB} \geq V_{AKB} \geq \min V_{AKB}, \\
 \max U_{AKB} \geq U_{AKB} \geq \min U_{AKB}, \max I_{AKB} \geq I_{AKB} \geq \min I_{AKB}; \\
 \max N_{СП} \geq N_{СП} \geq \min N_{СП}, \max \eta_{СП} \geq \eta_{СП} \geq \min \eta_{СП}, \max t_{СП} \geq t_{СП} \geq \min t_{СП}, \\
 \max m_{СП} \geq m_{СП} \geq \min m_{СП}, \max \zeta_{СП} \geq \zeta_{СП} \geq \min \zeta_{СП}, \max V_{СП} \geq V_{СП} \geq \min V_{СП}, \\
 \max U_{П АКБ} \geq U_{П АКБ} \geq \min U_{П АКБ}, \max I_{П АКБ} \geq I_{П АКБ} \geq \min I_{П АКБ}, \max f \geq f \geq \min f; \\
 \hline
 \max D_{ПК} \geq D_{ПК} \geq \min D_{ПК}, \max S_{ПК} \geq S_{ПК} \geq \min S_{ПК}, \max P_{ПК} \geq P_{ПК} \geq \min P_{ПК}, \\
 \max t_{ПК} \geq t_{ПК} \geq \min t_{ПК}, \max m_{ПК} \geq m_{ПК} \geq \min m_{ПК}, \max \zeta_{ПК} \geq \zeta_{ПК} \geq \min \zeta_{ПК}, \\
 \max F_K \geq F_K \geq \min F_K, \\
 \max n_{ПК} \geq n_{ПК} \geq \min n_{ПК}, \max M_{ПК} \geq M_{ПК} \geq \min M_{ПК}, \max F_{ПК} \geq F_{ПК} \geq \min F_{ПК};
 \end{array} \right.$$

На основании приведенных ограничений можно выбрать решение, которое обращает целевую функцию фазовой переменной в максимум или минимум. Примером задачи максимизации целевой функции фазовой переменной может быть коэффициент полезного действия, мощность, сила тяги и другие параметры шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. Задачами минимизации целевой функции фазовой переменной могут являться стоимость звена функциональной модели, масса при условии сохранения требуемых технических параметров и т. д.

Определив параметры каждого звена функциональной модели, имея описание взаимосвязей между отдельными элементами и граничные условия фазовых переменных звеньев тягового электрического привода шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге, приведем описание функциональной модели.

Электрическая энергия с аккумуляторной батареи подается на статический преобразователь тока, который преобразует электрическую энергию до требуемых значений по току, напряжению и в случае применения двигателей переменного тока по частоте. Статический преобразователь также выполняет коммутирующую функцию в силовой цепи тягового электропривода шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. Сигналами обратной связи статического преобразователя для системы управления являются действительные (требуемые) значения тока, напряжения и частоты в цепи тяговых электродвигателей.

В тяговых электродвигателях происходит электромеханическое преобразование электрической энергии в вращающий момент на валу

якоря или ротора, который приводит во вращение ведомый вал механического редуктора. Сигналы обратной связи тяговых электродвигателей, ток, напряжение, частота вращения, вращающий момент и частота тока, в случае применения двигателей переменного тока, на основании данных сигналов система управления формирует управляющие воздействия.

Механический редуктор преобразует механическую энергию вращения вала якоря/ротора тягового двигателя с требуемым передаточным отношением и приводит во вращение приводные колеса шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге.

Приводные колеса преобразуют механическую энергию в кинетическую энергию движения шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге.

Система торможения шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге выполняет функции снижения скорости движения и (или) остановки.

Совокупность устройств измерения и контроля формируют сигналы обратной связи от звеньев привода шахтного подвешного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. Результирующий сигнал требуемых параметров и режимов работы подается в систему управления. Система управления формирует управляющие воздействия, которые поступают на статический преобразователь и систему торможения.

Выводы

На основании методов решения комбинаторно-оптимизационных задач определен оптимальный уровень и организация функциональной модели работы шахтных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге. Разрабо-

танная модель позволяет определить функциональные связи между элементами электрического привода и системы управления шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. В отличие от других моделей приведенная модель учитывает не только технические, но и стоимостные показатели элементов тяговой передачи шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге. Характерной особенностью разработанной модели является ее универсальность, так как она учитывает параметры работы тяговой передачи как с электродвигателями постоянного тока, так и асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

Получены системы ограничений для фазовых переменных звеньев функциональной модели работы шахтного подвесного монорельсового локомотива на аккумуляторной тяге, на основании которых можно выбрать решение, обращающее целевую функцию фазовой переменной в максимум или минимум.

Полученные результаты рекомендуется использовать при синтезе моделей, обобщении или декомпозиции параметров и режимов работы шахтных подвесных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге, что расширит их область применения для круга инженерно-технических работников транспортных систем горных предприятий.

Список литературы

1. Васильев К. А., Николаев А. К., Сазонов К. Г. Транспортные машины и оборудование шахт и рудников. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 544 с.
2. Pieczora E., Suffner H. Rozwój napędów dołowych kolejek podwieszonych // *Maszyny Górnicze*. 2017. Vol.35. No.3. P. 44-57.
3. Тарасов В. М., Тарасова Н. И., Буялич Г. Д., Ефлов А. Е., Тарасов Д. В. Повышение эффективности работы подвесного монорельсового транспорта за счет рационального размещения груза // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016. №4. С. 89-101.
4. Pieczora E., Tokarczyk J. Development of mine underground transportation with use of suspended monorails // *Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2017. Vol. 55. No. 4 (532). P. 96-106.
5. Рябко К. А., Гутаревич В. О. Обоснование технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов // *Горные науки и технологии*. 2021. № 6(2). С. 136-143. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>
6. Tokarczyk J., Dudek M. Methods for computer aiding the configuration and assessment of auxiliary mine transportation means // *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol.28. Is.4. P. 268-275.
7. Drwięga A., Polnik B., Kalita M. Innowacyjne urządzenia transportowe z elektrycznym napędem akumulatorowym // *Maszyny Górnicze*. 2015. No.3. P 36-44.
8. Pieczora E., Polnik B. Nowe rozwiązania napędów elektrycznych do górniczych maszyn transportowych // *Cuprum: czasopismo naukowo-techniczne górnictwa rud*. 2015. No.3. P. 199-210.
9. Herbuś K., Szeverda K., Świder J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines // *Eksploracja i Niezawodność*. 2020. Vol.22. No.4. P. 610-619.
10. Szeverda K., Tokarczyk J., Wieczorek A. Impact of Increased Travel Speed of a Transportation Set on the Dynamic Parameters of a Mine Suspended Monorail // *Energies*. 2021. Vol.14. No.6. P. 1-15.
11. Świder J. et al. Testing the Impact of Braking Algorithm Parameters on Acceleration and Braking Distance for a Suspended Monorail with Regard to Acceptable Travel Speed in Hard Coal Mines // *Energies*. 2021. Vol.14. No.21. P. 1-20.
12. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. 513 с.
13. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 813 с.
14. Ватутин Э. И., Титов В. С., Емельянов С. Г. Основы дискретной комбинаторной оптимизации. М.: Аргамак-Медиа, 2016. 270 с.
15. Пушкарев И. А. Структурная и функциональная модели теплового насоса // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. 2013. №4. С. 186-191.
16. Монорельсовый аккумуляторный руднично-шахтовый локомотив «МАРШалЬ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oaоex.ru/upload/docs/MARShal.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения 02.11.2021).
17. Тутубалин П. И., Кирпичников А. П. Структурно-функциональная модель бортовой экспертной системы управления перспективного беспилотного летательного аппарата // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. Т.20. №20. С. 101-108.
18. Космодамианский А. С., Антипин Д. Я.,

Маслов М. А., Шевченко Д. Н. Применение объектной модели для конструирования тягового привода локомотива // Вестник Брян-

ского государственного технического университета. 2019. №10(83). С. 39-47.

К.А. Рябко

Donetsk Institute of Railway Transport (Donetsk)

FUNCTIONAL MODEL OF OPERATION OF A MINES SUSPENDED MONORAIL LOCOMOTIVE ON STORAGE BATTERY TRACTION

Background. *Currently more and more widespread use in the transport systems of mining enterprises is finding suspended monorail locomotives on battery traction. The efficiency of their functioning largely depends on the quality of the assessment, substantiation of the parameters and modes of operation of the traction means. It is advisable to evaluate these parameters according to the functional model of work. The development of the model will make it possible to determine the functional connections between the elements of the electric drive and the control system of the mine suspended monorail locomotive on battery traction.*

Materials and/or methods. *Development of a functional model for the operation of a mine suspended monorail locomotive on battery traction, determination of its levels of detail, restrictions and grouping of the function of the elements. Determination of functional connections between the elements of the electric drive and the control system.*

In order to develop a functional model for the operation of a mine suspended monorail locomotive on battery traction, an integrated approach, methods of applied mathematical statistics and the basics of combinatorial optimization are used.

Results. *In this article a functional model of the operation of a mine suspended monorail locomotive on battery traction has been developed, its optimal level and organization have been determined. Systems of constraints for the phase variables of the links of the developed functional model are obtained, on the basis of which it is possible to choose a solution that converts the objective function of the phase variable to a maximum or minimum.*

Conclusion. *The developed model can be used in the study of functional connections between the elements of the electric drive and the control system. Unlike other models, the resulting model takes into account not only the technical, but also the cost indicators of the traction drive elements of the mine suspended monorail locomotive on battery traction.*

Keywords: *mine suspended monorail locomotive, functional model, storage battery, electric drive, control system, links, input and output parameters.*

Сведения об авторе

К.А. Рябко

SPIN-код: 7192-6321
 Author ID: 57203884218
 ORCID iD: 0000-0003-4391-506X
 Телефон: +380 (71) 307-73-15
 Эл. почта: railroader@yandex.ru

Статья поступила 29.08.2021 г.

© К.А. Рябко, 2021

Рецензент д.т.н., проф. В.О. Гутаревич