

УДК 622.621

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ РУДИЧНЫХ ПОВЕЗДОВ

В.Н.КОРДАКОВ

Для обеспечения безопасности движения поездов в настоящее время широкое применение находят системы СЦБ, основанные на использовании световой сигнализации. При возникновении аварийных ситуаций поезд по сигналам светофора останавливается машинистом. Монотонный характер работы в условиях однообразия окружающей среды способствует снижению реакции машиниста на сигналы светофора. Это в значительной мере определяет снижение уровня безопасности на рудничном электровозном транспорте. Повышение безопасности движения поездов возможно за счет создания автоматических систем, работа которых не зависит от реакции машиниста электровозов и определяется ситуацией на транспортной сети.

Автоматические системы обеспечения безопасности движения поездов основаны на разбиении транспортной сети на отдельные контролируемые секции, на которых может находиться только один поезд. Эти системы включают в себя подсистемы контроля положения поездов на транспортной сети, блокировки секций безопасности, диспетчерского контроля и управления и автоматического торможения поезда.

Подсистема контроля положения поездов предназначена для фиксации их местонахождения на секционированной транспортной сети. Для рудничных условий в настоящее время целесообразно использовать точечные методы контроля. Применение рельсовых цепей при наличии токопроводящих вод и грязи ухудшает надежность работы рассматриваемой системы.

Конотопским заводом «Красный металлист» выпускаются датчики контроля положения типа ДКП-3,5, которые предназначены для фиксации прохождения поездов в контролируемой зоне. При применении систем обеспечения безопасности движения поездов, основанных на предварительном включении разрешающего сигнала, возможно использование контактных датчиков типа ДНД. Несрабатывание датчика не приводит к возникновению аварийных ситуаций на транспортной сети. Повышается надежность элементной базы подсистемы контроля положения поездов и упрощается схема автоматической системы обеспечения безопасности на участках со встречным движением поездов.

Конструктивно секции безопасности, которые располагаются на транспортной сети, представляют собой отдельные участки контактной сети или шлейфовые зоны. Наличие напряжения или разрешающего сигнала на этих участках служит информацией для продолжения движения поезда, а отсутствие сиг-

нала - для останова. Длина секций безопасности должна превышать длину тормозного пути, в противном случае будет потеряна управляемость электровозом. Режим работы секций безопасности согласовывается между собой и зависит от расположения поездов. Расстояние между секциями безопасности определяется требованием обеспечения заданной производительности электровозного транспорта.

Взаимосвязь режимов работы секций безопасности определяется типом структурной схемы подсистемы блокировки. Существует два типа подсистем блокировки секций безопасности, которые отличаются количеством и расположением контролируемых зон, принадлежащих одной секции безопасности. Для первого типа характерным является расположение датчиков контроля положения за секцией безопасности по ходу движения поезда на расстоянии, равном его длине. При применении второго типа перед секцией безопасности дополнительно устанавливается вторая контрольная зона.

Принцип работы первого типа основан на образовании обесточенной секции за движущимся поездом. Запрос на включение секции безопасности осуществляется сзади идущим поездом. Включение этой секции возможно при условии выхода первого поезда за вторую секцию безопасности, расположенную по ходу движения поездов. При применении второго типа подсистемы не происходит отключения секции безопасности идущим поездом. Секция безопасности отключается только в аварийных случаях, возникновение которых определяется условием - впереди идущий поезд не вышел с секции безопасности, а сзади идущий поезд располагается у входа в рассматриваемую секцию.

Преимуществом первого типа является в два раза меньшее количество контрольных зон, недостатком - меньший срок службы (при одинаковой интенсивности движения поездов) выходной коммутационной аппаратуры. Второй тип подсистемы блокировки обладает в два раза большей надежностью выходной коммутационной аппаратуры, но при этом число путевых датчиков увеличивается.

Выбор типа подсистемы блокировки для различных участков транспортной сети определяется технико-экономическими расчетами по критерию минимизации приведенных затрат с учетом срока службы откаточного горизонта.

Подсистема диспетчерского контроля и управления системы обеспечения безопасности движения поездов предназначена для контроля местоположения поездов на транспортной сети, работоспособности коммутационной аппаратуры и организации безостановочного движения поездов в случае выхода из строя отдельных подсистем контроля положения или блокировки секций безопасности до момента их восстановления. Данная подсистема включает в себя пульт-манипулятор и систему телемеханики, предназначенную для связи диспетчера с управляемыми объектами. На пульте-манипуляторе располагаются клавиши, с помощью которых осуществляется включение и отключение отдельных секций безопасности. Проверка работоспособности автоматической системы обеспечения безопасности движения поездов производится в начале каждой смены.

Отсутствие напряжения на секциях безопасности служит сигналом для включения на электровозе подсистемы автоматического торможения поезда. На существующих рудничных электровозах имеется поджигателя автоматического механического торможения, основанная на использовании электропневматических вентилях типа ВВ-34. При исчезновении напряжения в контактной сети через определенное время накладываются тормозные колодки на бандажи ведущих колес. Существующая система торможения предусматривает наличие сжатого воздуха в пневмовентиле, что является ее существенным недостатком. Поэтому целесообразно разработать систему торможения, основанную на использовании пружинного или грузового приводов. Для уменьшения истирания колодочных тормозов и повышения надежности тормозной системы электровоза перспективным является разработка автоматического электродинамического торможения. Основной специфической особенностью этого торможения является отсутствие на контактных электровозах источника постоянного напряжения.

Таким образом, в настоящее время существуют технические средства для создания автоматической системы обеспечения безопасности движения рудничных поездов.

При проектировании системы обеспечения безопасности движения поездов необходимо определить расположение секций безопасности на транспортной сети откаточного горизонта с учетом возможных маршрутов движения поездов.

Гарантированное безостановочное движение поездов возможно при установке двух секций безопасности между движущимися поездами и зависит от расстояния между поездами.

Существующая методика<sup>х</sup> определения расстояния между поездами, которое равно произведению интервала между поездами на их среднюю скорость движения, не учитывает рассогласование скоростей поездов, движущихся друг за другом, что при секционировании транспортной сети определяет условие безостановочности их движения. Применение автоматических систем обеспечения безопасности без учета рассогласования скоростей движения поездов приведет к их ложному останову и последующему неоправданному затрату энергии на пуск поезда. Поэтому необходимо разработать методику определения расстановки секций безопасности, учитывающую данное положение.

Основными причинами, влияющими на изменение скорости движения поездов, являются переменный характер профиля откаточных путей, разброс параметров приводов электровозов и сопротивлений движению, изменение напряжения в контактной сети. Учет в методике расчета изменения перечисленных параметров позволит проанализировать влияние отдельных переменных составляющих и определить пути по организации безостановочного движения поездов.

<sup>х</sup> Транспорт на горных предприятиях / Под ред. Б.А. Кузнецова. М., Недра, 1976.

Для следующих друг за другом двух одиночных поездов при условии работы приводов в зоне упругого скольжения расстояние между поездами определяется на основании решения системы уравнений

$$M_{1,2} \frac{dV_{1,2}}{dt} = F_{1,2} - \Sigma W_{1,2};$$

$$F_{1,2} = k'_2 I_{1,2} D_{\kappa} (D_{\kappa} \pm \Delta D_{\kappa})^{-1} \operatorname{arctg} \left\{ M' \left[ I_{1,2} (1 - \gamma) + \frac{U_{1,2}}{U_H} \gamma I_A \right] \right\};$$

$$V_{1,2} = (U_{1,2} - R_A I_{1,2}) (k'_1)^{-1} D_{\kappa}^{-1} (D_{\kappa} \pm \Delta D_{\kappa}) \operatorname{arctg} \left\{ M' \left[ I_{1,2} (1 - \gamma) + \frac{U_{1,2}}{U_H} \gamma I_A \right] \right\} \geq 0;$$

$$\Sigma W_{1,2} = g(P + Q \pm \Delta Q) [\omega_0 + i(L_{1,2})];$$

$$M_{1,2} = 1,075(P + Q \pm \Delta Q) 10^3;$$

$$L_1 = \int_0^{t_1} V_1 dt \leq L_{\kappa};$$

$$L_2 = \int_{\Delta t_T}^{t_2} V_2 dt \leq L_{\kappa};$$

$$U_1 = U_{\Pi} - I_A r_T L_1 \cdot 10^{-3};$$

$$U_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } L_1 < \Delta l_T; \\ U_{\Pi} - I_A r_T L_2 \cdot 10^{-3} & \text{при } L_1 \geq \Delta l_T; \end{cases}$$

$$\Delta l_T = \int_0^{\Delta t} V_1 dt; \quad \Delta t_T = 9 \cdot 3,6 \cdot 10^3 k_3^{-1} \alpha_{\kappa}^{-1};$$

$$\Delta l = L_1 - L_2,$$

где  $M_{1,2}$  - приведенные массы первого и второго электровозов, кг;  $V_{1,2}$  - скорости движения первого и второго поездов;  $F_{1,2}$  - тяговые усилия электровозов, Н;  $\Sigma W_{1,2}$  - сопротивления движению электровозов, Н;  $M'$ ,  $k'_1$ ,  $k'_2$  - постоянные коэффициенты привода электровозов;  $I_{1,2}$  - токи тяговых двигателей электровозов, А;  $I_A$  - часовые значения тока тяговых двигателей, А;  $D_{\kappa}$ ,  $\Delta D_{\kappa}$  - диаметр и изменение диаметра ведущих колес электровозов, м;  $\gamma$  - степень компаундирования тяговых двигателей;  $U_{1,2}$  - напряжения, подаваемые на электровозы, В;  $U_H$ ,  $U_{\Pi}$  - номинальное и выходное напряжения тяговых двигателей и подстанции, В;  $P$ ,  $Q$  - массы электровоза и прицепной части поезда, т;  $\Delta Q$  - приращение массы прицепной части поезда, т;  $\omega_0$  - основное удельное сопротивление движению вагонетки, Н · км<sup>-1</sup>;  $i$  - уклон пути, ‰;  $L_1$ ,  $L_2$  - пути, проходимые поездами за опре-

делегный промежуток времени, м;  $L_k$  - расстояние от разгрузочного до погрузочного пункта, м;  $r_T$  - сопротивление единицы тяговой сети, Ом;  $q_c$  - грузоподъемность поезда, т;  $Q_{\text{ч}}$  - часовая производительность транспорта.

Переменными величинами в системе уравнений (I) являются  $\Delta D_k$ ,  $\Delta Q$ ,  $U_1$  и  $U_2$ . Знак плюс у переменных относится к первому поезду, а минус - ко второму.

На основании натуральных измерений установлено, что  $\Delta D_{k \text{ доп}} = 0,01-0,03 D_k$ ;  $\Delta Q_{\text{доп}} = (0,15-0,2) Q_{\text{ч}}$ . При исследовании системы уравнений (I) заданными величинами являются  $i = f(L)$ ;  $U_{\text{п}}$ ,  $U_{\text{н}}$ ,  $r_T$ ,  $Q_{\text{ч}}$ , типы и число вагонов.

Исследование проводилось применительно к существующим рудничным контактным электровозам и вагонеткам типа ВГ-9, ВГ-4,5 А. Уклон пути изменялся в пределах  $i = \pm 10 \text{ ‰}$ . Средневзвешенная длина откатки составляла 4000 м при годовой производительности 2 и 8 млн. т горной массы.

В результате проведенных исследований с помощью методов аналогового математического моделирования установлено, что переменные параметры в одинаковой степени оказывают влияние на изменение конечного расстояния между поездами по отношению к первоначальной величине (оно уменьшается в среднем в два раза). Это показывает необходимость учета изменения скоростей движущихся друг за другом поездов при секционировании транспортной сети.

Для обеспечения требуемой производительности электровозного транспорта интервалы времени между поездами должны быть равны или меньше величины  $\Delta t_T$ . Вследствие рассогласования скоростей движения поездов возможно уменьшение расстояния между поездами. Минимальное расстояние между поездами должно быть больше минимальной конструктивной длины участка пути, оборудованного автоматической системой обеспечения безопасности, т. е.

$$\Delta l_{\text{min}} \geq \Delta l_{c \text{ min}}, \quad (2)$$

где  $l_{c \text{ min}}$  - минимальная величина участка пути, оборудованная системой обеспечения безопасности при условии безостановочного движения поездов,

$$l_{c \text{ min}} = 2(l_T + l_{\text{п}}), \quad (3)$$

$l_T$  - длина тормозного пути поезда, м;  $l_{\text{п}}$  - длина поезда, м.

Для заданных параметров привода электровоза разбиение транспортной сети на секции безопасности осуществляется на основании решения системы уравнений (I). При этом через равные промежутки времени  $\Delta t_T$  определяется значение  $\Delta l$ , которое должно удовлетворять условию (2). Расстояние между смежными секциями безопасности

$$l_{\text{Г}} = \Delta l - \Delta l_{\text{min}} \quad (4)$$

и по мере увеличения числа секций уменьшается.

При невыполнении условия (2) решается вопрос о стабилизации скорости движения поездов. В этом случае увеличивается величина степени компаундирования тяговых двигателей  $\gamma$  до выполнения условия (2).

Стабилизация скорости движения поездов производится одним из существующих методов. Для большинства горных предприятий откаточные выработки имеют выдержанные профили пути, т.е.  $i = \text{const}$ .

При движении поездов с постоянными скоростями  $V_1$  и  $V_2$  (примем худшее условие  $V_2 > V_1$ ) величина рассогласования скоростей

$$\Delta V = \frac{(\Delta l_T - \Delta l_K) \bar{V}}{L_K}, \quad (5)$$

где  $\Delta l_K$  - конечное расстояние между поездами, м;  $\bar{V}$  - среднеходовая скорость движения первого поезда.

Для определения соответствия параметров поезда и жесткости скоростных характеристик привода электровоза переменным величинам  $\Delta Q_{\text{доп}}$ ,  $\Delta D_{\text{доп}}$  для заданных условий откатки  $V$ ,  $L_{\Pi}$  и  $i$  необходимо вычислить по формуле (5)  $\pm \Delta V_{\text{max}}$  при  $\Delta l_K = \Delta l_{c \text{ min}}$ . По скоростным характеристикам привода электровоза определяется изменение тягового усилия  $\pm \Delta F$  от средней величины  $\bar{F}$ , которые соответствуют значениям  $\pm \Delta V_{\text{max}}$  и  $\bar{V}$ . Из уравнения движения поезда для установившихся режимов определяются пределы изменения  $\pm \Delta Q_p$  и  $\pm \Delta D_{\text{кр}}$ , которые сравниваются с указанными выше значениями. При  $\pm \Delta Q_p \leq \pm \Delta Q_{\text{доп}}$  и  $\pm \Delta D_{\text{кр}} \leq \pm \Delta D_{\text{доп}}$  транспортная сеть разбивается на секции безопасности. В противном случае решается вопрос о стабилизации скоростных характеристик привода электровоза или изменений (увеличений) массы поезда. Это позволит обеспечить требование безостановочного движения поездов по секционированной транспортной сети от начального до конечного пунктов.

Расстояние между поездами для участка пути  $S$  определяется из выражения

$$\Delta l_S = \frac{\Delta l_T \bar{V} - \Delta V_{\text{max}} L_{S-1}}{\bar{V} + \Delta V_{\text{max}}}, \quad (6)$$

где

$$L_{S-1} = \sum_{m=1}^{s-1} \Delta l_m, \quad (7)$$

$\Delta l_m$  - расстояние между поездами для предыдущих участков безопасности  $m$ , м.

В соответствии с выражением (4) вычисляется расстояние между смежными секциями безопасности при условии  $\Delta l = \Delta l_S$ .

Количество участков безопасности  $N$  должно быть равно натуральному числу и при заданной длине транспортировки  $L_K$  определяется из условия

$$L_K \leq \sum_{m=1}^N \Delta l_m. \quad (8)$$

В случае соблюдения неравенства (8) вычисляется дополнительное расстояние

$$\Delta l_{\text{доп}} = \sum_{m=1}^N \Delta l_m - L_K, \quad (9)$$

на которое уменьшается величина  $l_r$  одного или нескольких участков безопасности.

В соответствии с представленной методикой были определены параметры секционированной транспортной сети для концентрационных горизонтов рудников «Молибден» Тырнаузского вольфрамо-молибденового и Алтын-Топкан Алмалыкского горно-металлургического комбинатов.