

3. Розенберг Е.Н., Лысиков М.Г., Ольшанский А.М., Игнатенков А.В. Гибридное нейросетевое управление транспортными системами//Автоматика. Связь. Информатика. – 2017. – №12. – С. 2-5.

4. Маркевич А.В., Сидоренко В.Г. Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма//Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3. – С. 36-49.

5. Кулагин М.А., Маркевич А.В., Сидоренко В.Г. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / Материалы XXVII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС 2019), 18 декабря 2019 г. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 265-270.

6. Исаков Т.А., Сидоренко В.Г. Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла//Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №6. – С. 32-35.

7. Сидоренко В.Г., Чжо М.А., Алексеев В.М., Розенберг Е.Н., Уманский В.И. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов//Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 73-76.

Пудовиков О.Е.

Выбор алгоритмов и параметров системы автоматического управления скоростью длинносоставных тяжеловесных поездов по критерию безопасности движения

Аннотация: Нерациональное управление тяговыми и тормозными средствами длинносоставных грузовых поездов способствует возникновению предпосылок к аварийным ситуациям, представляющих угрозу безопасности движения. В работе рассмотрен подход к выбору структуры и параметров системы автоматического управления скоростью движения грузового поезда с сосредоточенной или распределённой тягой. Предложенные решения позволяют обеспечить требуемый уровень качества управления скоростью, а также повысить

безопасность движения в результате снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: система автоматического управления скоростью, грузовой поезд, параметрический синтез, продольные колебания поезда

Введение в обращение длинносоставных тяжеловесных поездов является действенным способом повышения провозной способности железных дорог. Вождение таких поездов осуществляется локомотивами, реализующими значительные величины сил тяги и торможения. Для вождения сдвоенных и соединённых поездов используют несколько локомотивов, распределённых по длине состава.

Грузовой поезд представляет собой распределённую многомассовую механическую систему, элементы которой (локомотивы и вагоны) взаимодействуют друг с другом через нелинейные и нелинеаризуемые связи с зазором и рассеиванием энергии (автосцепки и поглощающие аппараты). Элементы этой системы перемещаются под действием внешних сил – тяги, торможения, сопротивления движения, а также реакций в межвагонных связях.

Нерациональное управление тяговыми и тормозными средствами поездов, ошибки, допущенные при их формировании, движение поездов по переломам профиля, ведут к возникновению продольных колебаний, сопровождающихся изменениями продольных сил в поезде, характеризующихся значительной амплитудой. В некоторых случаях величины этих сил превышают значения, максимально допустимые по условиям прочности автосцепных устройств вагонов и локомотивов. Помимо этого, неблагоприятное протекание переходных процессов, сопровождающееся колебаниями продольной силы в межвагонных связях, способствует ускоренному накоплению усталостных повреждений в конструкциях вагонов, повреждению их и грузов. Совокупность этих неблагоприятных факторов способствует возникновению внезапных и постепенных отказов автосцепных устройств подвижного состава, заключающихся в их разрушении и, как следствие, разрыве поезда, что является нарушением условий безопасности движения, ведущих к авариям и крушениям

подвижного состава, сопровождающихся существенным материальным ущербом, а в ряде случаев и человеческими жертвами.

В случае применения распределённой тяги, при нерациональном управлении локомотивами, позиционированными в различных местах поезда, возникают значительные продольные квазистатические сжимающие или растягивающие силы, способные вызвать потерю устойчивости вагонов с последующим сходом их с рельсов, что также является нарушением условий безопасности движения поездов.

Одним из способов повышения безопасности движения и экономической эффективности железнодорожного транспорта является применение систем автоматического ведения поездов (САВП), внешним контуром управления которых является контур регулирования времени хода, формирующий задание для подчинённого – системы автоматического управления скоростью (САУ) движения, выходной сигнал которой, в свою очередь, является задающим для автоматизированного тягового электропривода [1]. Рациональный выбор закона управления скоростью локомотива и алгоритма взаимодействия нескольких локомотивов, распределённых по составу, позволяет улучшить характер протекания переходных процессов в поезде и ограничить величины продольных динамических и квазистатических сжимающих и растягивающих сил. Вследствие этого снижается вероятность возникновения внезапных и постепенных отказов автосцепных приборов (в виде их разрушения), также предотвращает сход вагонов из-за потери устойчивости. Всё это способствует значительному повышению безопасности движения длинносоставных тяжеловесных поездов.

Задачей, возлагаемой на САУ скоростью, является обеспечение следующих режимов работы [2]:

- разгон или торможение до величины заданной скорости;
- поддержание скорости на заданном уровне (стабилизация) при непрерывно изменяющемся сопротивлении движению поезда;
- переход на выбег плавным уменьшением до нуля силы тяги (или торможения).

САУ скоростью грузового электровоза должна обеспечивать необходимое качество управления скоростью, оцениваемое как при

помощи типовых показателей качества, так и специфических, характерных для исследуемой системы. К последним относятся: величина наибольшей продольной динамической силы, возникающей в поезде, параметры, характеризующие характер изменения этих динамических сил, а также оценка запаса устойчивости вагонов [3, 4].

Для удовлетворения требованиям, предъявляемым к таким системам, разработана адаптивная самонастраивающаяся САУ скоростью, позволяющая компенсировать влияние изменения массы поезда на качество управления путём соответствующей настройки параметров контура регулирования скорости (рисунок 1) [2].

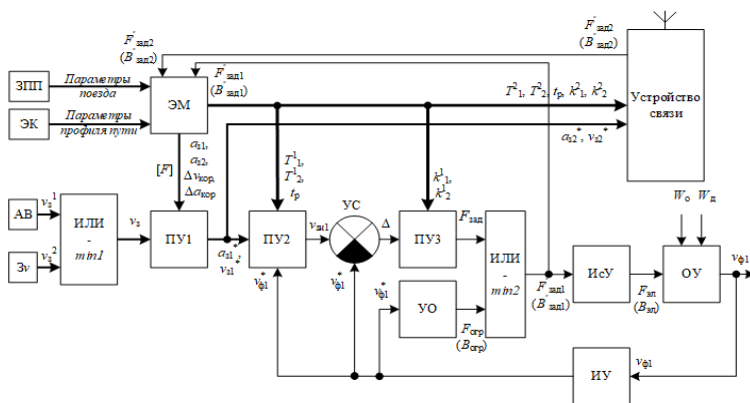


Рисунок 1 – Функциональная схема САУ скоростью грузового локомотива

Для обеспечения качества управления в переходных режимах работы САУ на входе замкнутого контура управления скоростью установлено промежуточное устройство ПУ2, реализующее оператор на основе инерционного звена второго порядка (1) с последующим интегрированием:

$$f(t) = p_a \cdot a_3 \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right], \quad (1)$$

$$v_{зи} = \int f(t) dt$$

Данный оператор сглаживает скачкообразно изменяющийся задающий сигнал, поступающий от вышестоящей системы

автоведения или от задатчика скорости. Исполнение сформированной промежуточным устройством кривой заданной скорости обеспечивает соблюдение требований к качеству управления скоростью в переходных режимах движения.

При использовании распределённой тяги задание по скорости для ведомого локомотива поступает от ведущего (головного) локомотива с использованием технологического канала связи, например *GSM* [2, 5]. Для обеспечения качества управления при использовании распределённой тяги выполняется корректировка задания скорости ведущего или ведомого локомотивов таким образом, чтобы поезд поддерживался в так называемом «растянутом» состоянии, предотвращая возникновение продольных колебаний. Корректировка задания осуществляется на основании информации о величинах продольных сил, возникающих в поезде в процессе движения, рассчитываемых при помощи эталонной модели грузового поезда ЭМ, реализованной в бортовой микропроцессорной системе (рисунок 1). Данная модель, описывающая движения экипажей поезда, представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка с размерностью, равной числу экипажей (вагонов и локомотивов) в поезде, а также уравнений межвагонных связей. Исходные данные для модели (количество и тип вагонов, параметры элементов профиля пути, силы тяги и торможения) поступают от задатчика параметров поезда ЗПП, электронной карты системы безопасности ЭК, с выхода устройства управления, в качестве которого использован пропорционально-интегральный регулятор.

Параметры сглаживающего устройства, закона управления, устройства вычисления корректирующего воздействия определены в результате решения задачи параметрического синтеза с использованием векторного критерия качества. Составляющими критерия являются величина наибольшей продольной динамической силы, время протекания переходного процесса, параметры, характеризующие протекание переходного процесса и запасы устойчивости вагонов поезда.

Используемый векторный критерий состоит из разнородных частных критериев, т.е. для получения наилучших их значений к системе управления скоростью предъявляются различные требования, поэтому отыскание параметров САУ,

удовлетворяющих всем критериям одновременно, не представляется возможным. Для преодоления данного затруднения исходная задача многокритериальной оптимизации сведена к однокритериальной, для чего использован обобщённый критерий оптимальности (целевая функция). Для выполнения данного перехода использован критерий, формируемый на основе отклонения частных критериев от «идеальной» альтернативы – критерий суммарных потерь [1, 6, 7]:

$$Ц = \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2} \quad (2)$$

где U_i^* – минимальное значение i -го критерия, получаемое при решении задачи однокритериальной оптимизации по этому i -му критерию;

U_i^{**} – максимальное или допустимое значение i -го критерия;

z – количество частных критериев оптимизации.

В результате решения задачи параметрического синтеза получены настроечные кривые, связывающие параметры САУ скоростью с массой поезда. Вычисление параметров с использованием данных кривых осуществляется в блоке эталонной модели САУ. На рисунке 2 приведены результаты моделирования движения поезда массой 6049 тонн, состоящего из 69 вагонов по 85 тонн, с использованием предлагаемой САУ и вычисленными параметрами: a – скорость движения поезда $v(t)$, b – сила тяги локомотива $F_k(t)$ и сила $F_{1-2}(t)$, действующая в соединении между локомотивом и первым вагоном, v – силы, действующие в серединах первой $F_I(t)$, второй $F_{II}(t)$ и последней $F_{III}(t)$ третьей поезда.

Результаты выполненного имитационного эксперимента с моделями поездов различной массы и длины, различными вариантами формирования, при движении в различных режимах показали, что использование предлагаемой адаптивной САУ скоростью движения поезда, изменяющей параметры контура регулирования скорости в зависимости от массы, обеспечить выполнение требований, предъявляемых к САУ скоростью длинносоставных тяжеловесных поездов, значительно повысит безопасность движения.

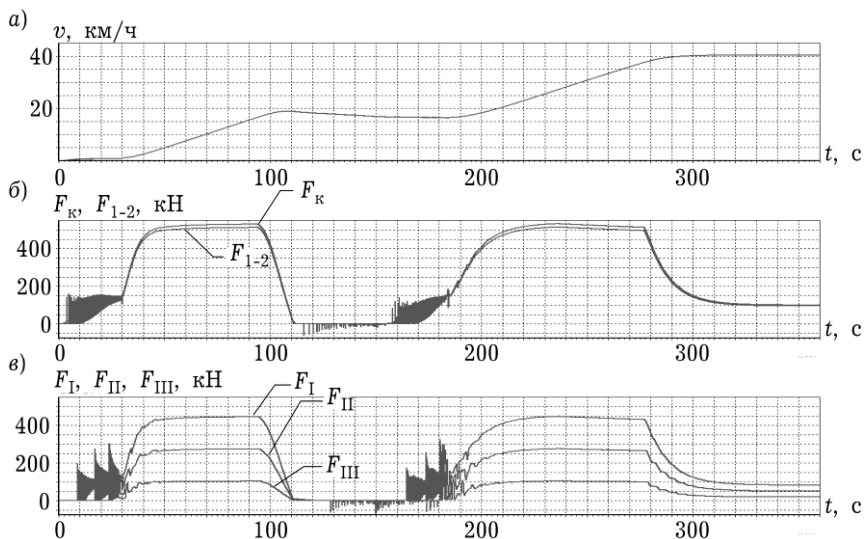


Рисунок 2 – Результаты моделирования работы САУ скоростью

Литература:

1. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Максимов В.М. и др. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л. А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 271 с.
2. Pudovikov O.E., Bepal'ko S.V., Kiselev M.D., Serdobintsev E.V. Application of a reference train model in an automatic control system of freight-train speed//Russian Electrical Engineering. – 2017. – Т. 88. № 9. – P. 563-567.
3. Баранов Л.А., Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е. Критерии качества регулирования скорости//Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. №4 (28). – С. 50-56.
4. Киселев М.Д., Пудовиков О.Е. Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой//Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 11-14.
5. Киселев М.Д., Пудовиков О.Е. Параметрический синтез системы автоматического управления скоростью грузового поезда при использовании распределенной тяги//Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 51-59.