

Д. В. УСТИМЕНКО (ДИИТ)

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ ПРИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ВЫПОЛНЕННАЯ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Пропонується система автоматичного регулювання гальмівного зусилля при рекуперації електровозів постійного струму, в якій необхідне гальмівне зусилля формується розв'язувальним пристроєм, побудованим на базі мікроконтролера, згідно з заданим законом, який забезпечує підвищення об'єму енергії рекуперації в порівнянні з існуючими варіантами. Наведені розрахунки перехідних процесів для найбільш характерних випадків роботи системи.

Предлагается система автоматического регулирования тормозной силы при рекуперации электровозов постоянного тока, в которой необходимое тормозное усилие формируется решающим устройством, построенным на базе микроконтроллера, в соответствии с заданным законом, который обеспечивает увеличение объема энергии рекуперации в сравнении с существующими вариантами. Приведен расчет переходных процессов для наиболее характерных случаев работы системы.

The authors suggest a system of automatic control of braking force at recuperation of d.c. electric locomotives, in which the necessary braking effort is generated by the decisive unit, constructed on the basis of a microcontroller, according to the pre-set law, which provides an increase of the volume of recuperative energy in comparison with existing variants. The calculation of transitional processes for the most typical cases of system operation has been provided.

В связи с острой необходимостью экономии электроэнергии в Украине, разработка и внедрение рациональных, с точки зрения увеличения возврата электроэнергии в сеть, способов управления процессом рекуперации имеет в настоящее время большое значение для железнодорожного транспорта. Автором предложен способ, при котором тормозная сила, развиваемая электровозом при рекуперации, изменяется не по ограничениям тормозной характеристики, как это принято в существующих схемах, а по закону, обеспечивающему рациональное увеличение энергии возврата. Такой способ управления рекуперативным торможением может быть реализован системой автоматического регулирования рекуперативного торможения (САР РТ), построенной на базе современных микроконтроллеров с высоким быстродействием. Функциональная схема предлагаемой САР РТ приведена на рис. 1. В режиме рекуперативного торможения система состоит из основной цепи регулирования и четырех ветвей обратной связи: по току рекуперации; по току возбуждения; по отношению токов возбуждения и рекуперации; по максимальному напряжению тяговых электродвигателей.

Основная цепь регулирования состоит из блока начальных условий (БНУ); решающего устройства (РУ); блока задания тока якоря

(ЗТЯ). В блок начальных условий с пульта управления вводятся значения массы состава, требуемое замедление, конечная скорость при торможении, среднее значение величины спрямленного уклона, а также с датчиков – текущая скорость движения состава и напряжение в контактной сети. Предлагаемая система обеспечивает рациональное, с точки зрения увеличения энергии возврата, торможение в заранее спланированных местах. Во всех остальных случаях применяется рекуперативное торможение с изменением тормозной силы по ограничениям тормозной характеристики. Сформированный сигнал в БНУ подается в решающее устройство (РУ), в котором производится вычисление необходимой величины тормозной силы для торможения по требуемому закону.

С РУ величина тормозной силы подается на вход блока задания тока якоря (ЗТЯ), в котором происходит пересчет тормозной силы в ток рекуперации. Из сигнала с выхода ЗТЯ, в узле сравнения, вычитается сигнал ветви обратной связи по току рекуперации, которая предназначена для стабилизации тока рекуперации при нормальном режиме рекуперативного торможения, т. е. при отсутствии юза, заданном отношении тока рекуперации к току возбуждения и при допустимом в эксплуатации напряжении в контактной сети.

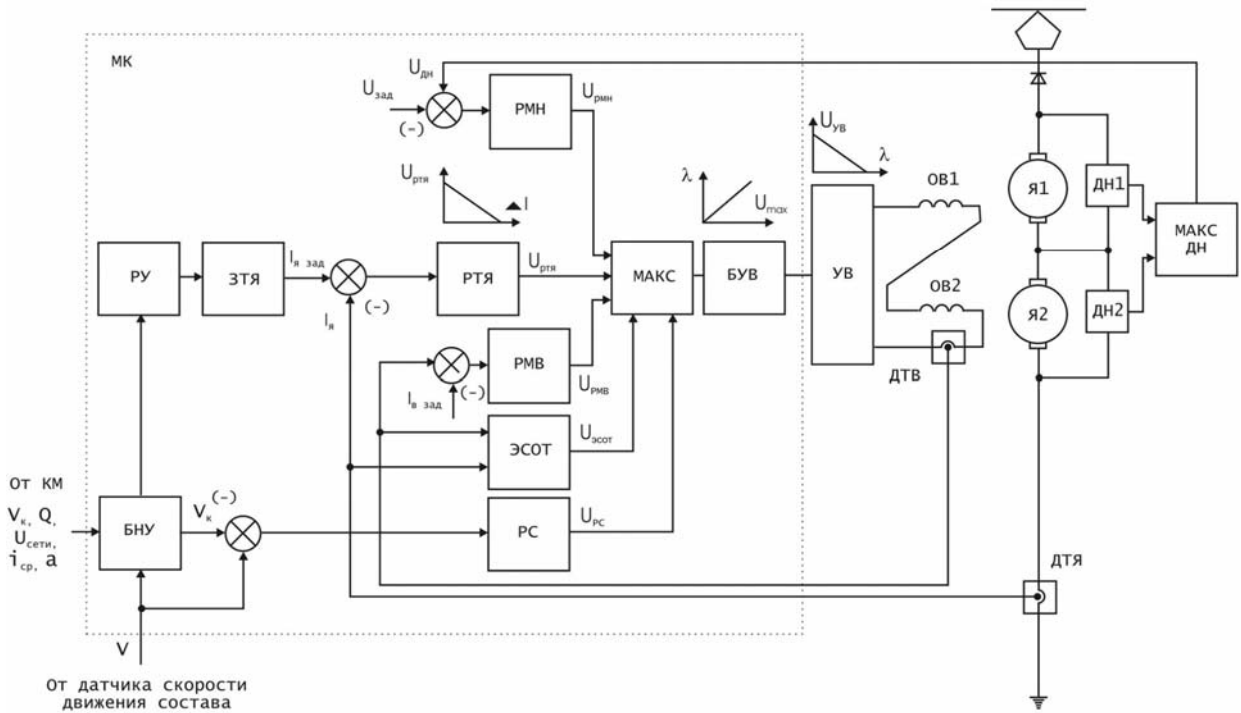


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемой САП РТ

Ветвь гибкой обратной связи по току возбуждения предназначена для стабилизации тока возбуждения при юзе и состоит из регулятора максимального возбуждения (РМВ), на входе которого действует разность между током возбуждения, поступающим от датчика, и его максимальным значением, которое задается для определенного типа тягового электродвигателя. Ветвь гибкой обратной связи по току возбуждения не участвует в регулировании тока рекуперации при отсутствии юза. Однако при его появлении эта ветвь через элемент МАКС берет на себя функции регулирования и стабилизирует ток возбуждения, т. е. магнитный поток.

Ветвь обратной связи по отношению токов рекуперации и возбуждения вступает в регулирование только на соединении «П» в области высоких скоростей при:

$$I_{я} \geq K_T I_B, \quad (1)$$

где  $K_T$  – коэффициент, зависящий от типа тягового двигателя;  $I_{я}$  – ток якоря, А;  $I_B$  – ток возбуждения, А.

Эта ветвь предназначена для ограничения тока рекуперации на уровне, определяемом соотношением (1), и состоит из элемента соотношения токов (ЭСОТ).

Ветвь обратной связи по напряжению на тяговых электродвигателях состоит из регулятора максимального напряжения (РМН), на входе

которого действует разница между заданным максимальным значением и текущим значением напряжения на тяговом электродвигателе, и предназначена для ограничения максимального напряжения на тяговых электродвигателях. Также РМН используется для реализации плавного входа электровоза в режим рекуперативного торможения с целью исключения больших бросков тока рекуперации.

Рассмотрим математическое описание элементов, входящих в систему.

Параметры элементов математической модели определены из условия, что момент инерции  $J$  поезда заданной массы, приведенный к валу одного тягового электродвигателя, при передаточном числе зубчатой передачи  $i_{ред}$  определяется как [1]

$$J = J_{дв} + J_{шест} + \frac{(J_{зуб.к} + J_{к.п})}{i_{ред}^2} + \frac{M_{п}\rho}{8}, \quad (2)$$

где  $J_{дв}$  – момент инерции якоря тягового электродвигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{шест}$  – момент инерции шестерни редуктора, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{зуб.к}$  – момент инерции зубчатого колеса редуктора, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{к.п}$  – расчетный момент инерции колесной пары, кг·м<sup>2</sup>;  $M_{п}$  – масса поезда, кг;  $\rho = \left(\frac{V}{\omega_{дв}}\right)^2$  –

радиус приведения;  $V$  – линейная скорость поезда, м/с;  $\omega_{\text{дв}}$  – угловая скорость вращения вала тягового электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ .

Момент сопротивления  $M_c$ , приведенный к валу одного тягового электродвигателя, при выбеге поезда на уклоне, Н·м:

$$M_c = \frac{M_{\text{п}} R_{\text{к.п}} g \eta_{\text{з.п}} (i_c - \omega_0)}{i_{\text{ред}} 8 \cdot 10^3}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{к.п}}$  – радиус колеса, м;  $\eta_{\text{з.п}} = 0,93$  – КПД зубчатой передачи;  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_0$  – основное сопротивление движению поезда на расчетном участке торможения, Н/кН;  $i_c$  – уклон участка пути, спрямленного в продольном профиле и плане, ‰.

Принимаем форму изменения напряжения на выходе регулятора тока якоря (РТЯ) по закону, описываемому алгебраическим уравнением:

$$U_{\text{ртя}} = U_{\text{ртя}(\text{max})} - K_{\text{ртя}} (I_{\text{я.зад}} - I_{\text{я}}), \quad (4)$$

где  $U_{\text{ртя}(\text{max})}$  – максимальное значение напряжения на выходе РТЯ, В;  $K_{\text{ртя}}$  – коэффициент передачи РТЯ;  $I_{\text{я.зад}}$  – величина тока якоря, задаваемая блоком ЗТЯ, А.  $I_{\text{я.зад}}$  определяется из уравнения для электромагнитного момента двигателя по заданной тормозной силе ( $B$ ):

$$I_{\text{я.зад}} = \frac{BR_{\text{к.п}} \eta_{\text{з.п}}}{i_{\text{ред}} \cdot C_{\text{м}} \Phi}, \quad (5)$$

где  $B$  – необходимая величина тормозной силы, рассчитываемая в решающем устройстве (РУ), Н.

Автором получена следующая зависимость для рационального закона изменения тормозной силы с точки зрения увеличения энергии возврата:

$$B = \left\{ \frac{(V - V_1) [1 + k(V + V_1)] (B_2 - B_1)}{(V_2 - V_1) [1 + k(V_2 + V_1)]} \right\} + B_1, \quad (6)$$

где  $(V_1; B_1)$ ,  $(V_2; B_2)$  – точки, через которые проходит расчетная кривая второго порядка, используемая для формирования тормозной характеристики;  $k$  – коэффициент деформации расчетной кривой.

Для обеспечения правильной работы системы при превышении током возбуждения своего допустимого значения, необходимо иметь на выходе РМВ следующий сигнал:

$$U_{\text{рмв}} = K_{\text{рмв}} (I_{\text{в}} - I_{\text{в.зад}}), \quad (7)$$

где  $I_{\text{в.зад}}$  – ток возбуждения, величина которого является наибольшей для данного типа двигателя, А;  $K_{\text{рмв}}$  – коэффициент передачи регулятора максимального напряжения, Ом.

Для обеспечения заданного алгоритма функционирования системы форма напряжения на выходе элемента соотношения токов (ЭСОТ) должна описываться следующим выражением:

$$U_{\text{э.сот}} = \left( \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{в}}} - K_{\text{т}} \right) K_{\text{э.сот}}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{э.сот}}$  – коэффициент передачи элемента соотношения токов, Ом.

Управляемый возбудитель (УВ), представляющий собой широтно-импульсный преобразователь из постоянного напряжения контактной сети в постоянное регулируемое напряжение от 2 до 30 В с выходным током 400 А. Поскольку он обладает незначительной инерционностью, то при моделировании его работы на нагрузку с большой индуктивностью (обмотка возбуждения) инерционностью УВ можно пренебречь, тогда формула среднего напряжения на выходе УВ [4] с учетом количества силовых ячеек и трансформатора примет вид:

$$U_{\text{ув}} = \frac{(1 - \lambda) U_{\text{сети}}}{N \cdot K_{\text{тр}}}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент заполнения импульсов в периоде ШИМ;  $N$  – количество силовых ячеек преобразователя, шт.;  $U_{\text{сети}}$  – величина напряжения в контактной сети, В.

Блок управления возбудителем (БУВ) осуществляет формирование импульсов управления полупроводниковыми приборами управляемого возбудителя. Взаимосвязь между сигналами входа и выхода БУВ описывается выражением

$$\lambda = U_{\text{max}} K_{\text{був}}, \quad (11)$$

где  $U_{\text{max}}$  – сигнал управления, действующий на выходе элемента МАКС, В;  $K_{\text{був}}$  – коэффициент передачи БУВ.

Тяговый электродвигатель постоянного тока с управлением по обмотке возбуждения описывается системой двух дифференциальных уравнений первого порядка [2]:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = C_{\text{м}} \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - U_{\text{сети}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \\ L_{\text{о.в}} \frac{dI_{\text{в}}}{dt} = U_{\text{ув}} - I_{\text{в}} R_{\text{ов}}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $L_{\text{я}}$ ,  $L_{\text{о.в}}$  – соответственно средние значения индуктивностей якорной цепи и обмотки возбуждения тягового двигателя, Гн;  $R_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{о.в}}$  – соответственно активное сопротивление якорной цепи и обмотки возбуждения тягового двигателя, Ом.

Уравнение движения [3]

$$J \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} = M_{\text{с}} - C_{\text{м}} \Phi \cdot I_{\text{я}}. \quad (13)$$

Система уравнений, описывающих работу САР РТ, может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{в}}}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{быв}}}\right) U_{\text{сети}}}{L_{\text{ов}} N K_{\text{тр}}} - \frac{I_{\text{в}} R_{\text{ов}}}{L_{\text{ов}}}, \\ \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{C_{\text{м}} \Phi \cdot \omega_{\text{дв}}}{L_{\text{я}}} - \frac{U_{\text{сети}}}{L_{\text{я}}} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}, \\ \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} = \frac{M_{\text{с}}}{J} - \frac{C_{\text{м}} \Phi \cdot I_{\text{я}}}{J}. \end{cases} \quad (14)$$

На выходе МАКС один из пяти входных сигналов, величина которого в данный момент наибольшая. В свою очередь характеристики регуляторов построены таким образом, что в нормальных условиях работает РТЯ, а РМН, РМВ и ЭСОТ при этом имеют минимальные сигналы, т.к. их задающие сигналы в нормальных условиях больше текущих значений соответственно напряжения в контактной сети, тока возбуждения и величина соотношения токов ниже предельного уровня. При нарушении любого из этих условий соответствующий канал регулирования берет управление процессом рекуперации на себя посредством элемента МАКС.

Для проверки работоспособности и достоверности предлагаемой математической модели применено компьютерное моделирование. В частности, для расчета переходных процессов и построения их графиков использовался пакет MATCAD 2000 PRO.

Для получения параметров модели использовались данные тягового электродвигателя

ЭД141У1 и механической передачи электровоза ДЭ1. Для определения магнитного потока в зависимости от тока возбуждения использовались линеаризованные нагрузочные характеристики указанного электродвигателя.

Расчеты производились для поезда массой 3184 т при его движении по уклону  $i_{\text{с}} = -5\%$  со скоростью 80 км/ч, результаты приведены на рис. 2, 3.

На рис. 2 представлены графики переходных процессов тока рекуперации и тока возбуждения при включении рекуперации, при напряжении в контактной сети 2600, 3000, 3600 В.

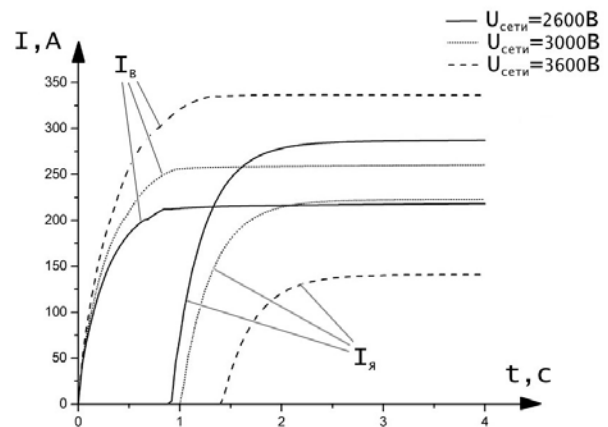


Рис. 2. Изменение  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$  при включении рекуперативного торможения

На рис. 3 представлены графики переходных процессов тока рекуперации и тока возбуждения при скачкообразном понижении напряжения в контактной сети в процессе рекуперации с 3400 до 3000 В.

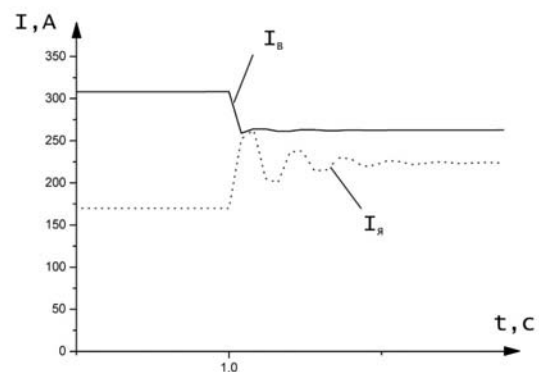


Рис. 3. Изменение  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$  при уменьшении напряжения сети на  $-400$  В

На рис. 4 представлены графики, характеризующие работу системы автоматического регулирования тормозной силы при торможении поезда с 80 до 65 км/ч. Изменение тока рекуперации

происходит в соответствии с величиной тормозной силы, рассчитанной в РУ по уравнению (6).

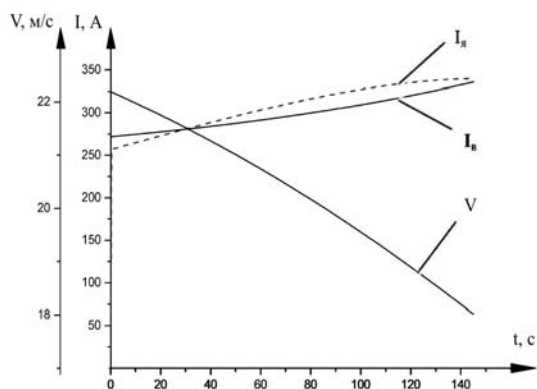


Рис. 4. Изменение  $I_{я}$ ,  $V$  и  $I_{в}$  при торможении с 80 до 65 км/ч,  $U_{сети} = 3300$  В.

Выполненные исследования динамических процессов доказали работоспособность математической модели и системы в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деев В. В. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987. – 263 с.
2. Черный О. П. Моделирование электромеханических систем / О. П. Черный, А. В. Луговой. – Кременчук, 2001. – 368 с.
3. Теория электропривода / Под ред. М. Г. Попович. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.
4. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

Поступила в редколлегию 08.06.04