

УДК 629.42.053

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ГОРОЧНОГО ТЕПЛОВОЗА

Определены показатели энергетической цепи тепловоза, влияющие на скорость движения локомотива. Осуществлен выбор законов управления для системы автоматического регулирования скорости тепловоза. Произведена оптимизация параметров регулятора скорости горючего тепловоза.

Основным элементом полурейса горючего тепловоза, который определяет эффективность применения переменной скорости роспуска, является разгон. Наиболее правильной основой для определения динамических характеристик разгона являются тяговые расчеты.

В магистральном движении определение характеристик процесса ведения поезда по участку осуществляется при помощи предварительно составленных программ автоведения, основанных на графике движения поездов по участку, известном весе поезда, плане и профиле участка и т.д.

Анализ технологии работы сортировочных станций и особенностей работы горючего тепловоза показывает, что тяговые расчеты в полном объеме перед началом полурейса горючего локомотива трудно произвести вследствие переменной массы состава и переменной скорости движения. Очевидно, что для обеспечения нужных показателей процесса роспуска составов необходимо проведение периодических или спорадических тяговых расчетов в течение всего полурейса горючего тепловоза.

Мощность дизеля, необходимая для осуществления движения состава с указанной скоростью, определится из выражения [1]

$$N_e = \frac{U_3(P+Q)(w_0+i)}{270h}, \quad (1)$$

где  $U_3$  – заданная скорость движения;  $P$  – масса локомотива;  $Q$  – масса состава;  $w_0$  – сопротивление движению;  $h$  – отношение средней касательной мощности тепловоза к мощности дизеля (степень приближения реальной тяговой характеристики к идеальной).

Принимая во внимание, что система автоматического регулирования уровня мощности дизель-генератора в пределах рабочей части характеристики на каждой из рабочих позиций контроллера поддерживает мощность генератора постоянной, справедливо тождество

$$N_e = \gamma_p i_{vy} U_T,$$

где  $\gamma_p$  – обобщенный коэффициент преобразования;  $i_{vy}$  – ток нагрузки тягового генератора;  $U_T$  – сигнал скорости движения локомотива с составом.

При установившемся движении касательная сила тяги  $F_k$  должна уравновешивать сопротивление движению  $\sum W$ :

$$F_k = \sum W.$$

Для определения взаимодействия скорости движения локомотива и координат энергетической цепи тепловоза ЭЦТ – тока нагрузки  $i_{vy}$  и угловой скорости  $U_T$  вала дизеля использована паспортная зависимость тока нагрузки тепловоза ТЭМ7 от скорости [2]. Преобразование этой характеристики в зависимость номера позиции регулятора дизеля от произведения  $i_{vy}U_T$  для постоянных значений токов нагрузки осуществлено графоаналитическим способом. Незначительная нелинейность кривых семейства полученных характеристик позволила определить значение требуемой позиции регулятора дизеля.

Для повышения точности регулирования необходимо наряду со ступенчатым управлением дизелем ввести регулирование мощности тягового синхронного генератора СГ. Обозначив сигнал управления для тягового генератора через  $U_c$ , можно получить тождество

$$U_y = U_n + U_c, \quad (2)$$

позволяющее сформировать следующую зависимость для контуров ступенчатого и аналогового управления силой тяги:

$$U_n + U_c = K_{py} U_i U_u + K_r U_i + K_\delta U_u + K_0 D_0, \quad (3)$$

где  $D_0$  – начальное значение аргумента;  $K_{py}$ ,  $K_r$  и  $K_\delta$  – коэффициенты, определяемые из аппроксимированного семейства характеристик;  $U_i$ ,  $U_u$  – сигналы нагрузки тягового генератора, соответственно, по току и напряжению;  $U_n$  – сигнал ступенчатого управления дизелем.

Сигнал управления  $U_T$  обусловлен ошибкой квантования, что дает возможность выбора закона управления для контура регулирования тока тягового генератора и определения его параметров.

При определении закона управления для контура регулирования СГ используются следующие предпосылки и допущения:

- регулирующее воздействие  $U_i$  контура регулирования тока тягового генератора СГ ограничено мощностью силовой установки, приходящееся на одну позицию регулятора дизеля, и должно обеспечивать астатическое регулирование;

- условия работы горючего тепловоза и техническое состояние рельсов, характеристики упругого скольжения колесных пар по рельсам и величины ускорений, развиваемых локомотивами, существенно ограничивают использование дифференциальной составляющей сигнала обратной связи на скорости;

– передаточная функция состава с локомотивом, как объекта управления, имеет выражение, соответствующее инерционному звену первого порядка с запаздыванием, а именно:

$$w_{c(s)} = \frac{K_c e^{-\tau_0 s}}{T_c s + 1}, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – время запаздывания объекта;  $T_c$ ,  $K_c$  – соответственно коэффициент усиления и постоянная времени локомотива с составом;

– применение регуляторов с нелинейными законами придает системе автоматического регулирования скорости САРС свойство инвариантности по отношению к изменениям собственных характеристик автоматизированного объекта, и к действующим на него внешним воздействиям.

При программном изменении задания время переходного процесса в практически реализуемой системе не может быть меньше, чем время запаздывания. Из этого следует условие взаимосвязи регулируемой величины  $U_y$  с  $U_c$  при идеализированном регуляторе:

$$U_{y(s)} = U_{c(s)} e^{-\tau_0 s}. \quad (5)$$

Для замкнутой САРС

$$U_{y(s)} = U_{c(s)} \frac{w_{p(s)}}{1 + w_{p(s)}} = U_{c(s)} w_{z(s)}, \quad (6)$$

где  $w_{p(s)} = w_{y(s)} w_{cr(s)} w_{c(s)}$  – передаточная функция разомкнутой САРС;  $w_{z(s)}$  – соответственно, замкнутой САРС;  $w_{y(s)}$  – передаточная функция регулятора.

Из совместного рассмотрения выражений (5) и (6) следует, что передаточная функция замкнутой САРС, содержащей идеализированный регулятор, должна быть вида

$$w_{z(s)} = e^{-\tau_0 s}. \quad (7)$$

В свою очередь передаточная функция замкнутой САРС, с учетом параметров локомотива с составом, имеет вид

$$w_{z(s)} = \frac{w_{y(s)} w_{cr(s)} w_{c(s)}}{1 + w_{y(s)} w_{cr(s)} w_{c(s)}}. \quad (8)$$

Приравняв правые части выражений (7) и (8) и решая полученное уравнение относительно  $w_{y(s)}$ , получим передаточную функцию идеализированного регулятора

$$w_{y(s)} = \frac{e^{-\tau_0 s}}{w_{cr(s)} w_{c(s)} (1 - e^{-\tau_0 s})}. \quad (9)$$

Передаточная функция (9) является трансцендентной и ее реализация затруднительна. В целях создания практически реализуемой САРС следует в передаточной функции (9) идеализированного регулятора звено запаздывания аппроксимировать в виде [3]

$$e^{-\tau_0 s} \approx 1 - \tau_0 s. \quad (10)$$

В результате такой аппроксимации выражение (9) с учетом передаточной функции (10) приводится к виду

$$w_{y(s)} = \frac{T_c s + 1}{w_{cr(s)} K_c \tau_0 s}. \quad (11)$$

Заменив  $w_{cr(s)}$  ее значением, приведенным в [4], выражение (11) можно представить в виде

$$w_{y(s)} = \frac{T_c s + 1}{K_{cr} K_c \tau_0 s} = \frac{T_c}{K_{cr} K_c \tau_0} \left[ 1 + \frac{1}{T_c s} \right]. \quad (12)$$

Полученная передаточная функция регулятора (12) отражает пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования [4]. Параметры ПИ-регулятора – коэффициент усиления  $K_{py}$  и постоянная времени  $T_{py}$ , с учетом выражения (12), должны соответствовать следующим зависимостям:

$$K_{py} = \frac{T_c}{K_{cr} K_c \tau_0}, \quad T_{py} = T_c. \quad (13)$$

Из анализа последнего выражения следует, что параметры ПИ-регулятора зависят от параметров состава с локомотивом. Непосредственное использование  $T_c$  и  $K_c$  затруднительно, т.к. измерение их связано с большими техническими сложностями. При поиске косвенной информации, эквивалентной  $T_c$  и  $K_c$ , выбор был остановлен на координатах состояния ЭЦТ  $1/U_{рд}$  и  $U_i$ , характер которых приближенно соответствует характеру изменения  $T_c$  и  $K_c$  в процессе роспуска. При использовании выражения  $1/U_{рд} + U_i$  в качестве сигнала коррекции  $U_k$  для контура регулирования СГ, параметры этого контура  $K_{py}$  и  $T_{py}$  будут иметь постоянные значения. Введение коррекции

$$U_k = \frac{1}{U_{рд}} + U_i \quad (14)$$

позволяет сформировать САРС инвариантной по отношению к возмущающему воздействию от изменения массы состава.

Методика анализа качества управления горочным тепловозом основана на моделировании процесса движения локомотива с составом в режиме надвига и роспуска с программным изменением скорости движения. В процессе исследований определен характер изменения регулируемой величины и степень приближения координаты  $U_{рд}$  к угловой скорости вала дизеля.

Влияние на  $U_{рд}$  коэффициентов  $K_{ру}$ ,  $K_r$ ,  $K_\gamma$  и  $K_0$  исследовано с использованием теории планирования эксперимента. Моделирование осуществлялось для шестнадцати вариантов системы. При этом на ЭВМ моделировался процесс изменения скорости при ступенчатом управляющем воздействии и фиксированных, в соответствии с матрицей планирования эксперимента, коэффициентах уравнения (3). Сравнение результатов моделирования и аналитического расчета показало, что предложенная методика хорошо согласуется с результатом эксперимента.

При выбранной структуре и алгоритме управления САРС исследование динамики сводится к решению задачи параметрической оптимизации управляющего устройства по выбранному критерию. Из особенности эксплуатации САРС следует, что минимизация перерегулирования является основным условием нормального функционирования системы, так как потери времени на ликвидацию повторной сцепки отделившегося отцепы от состава превышают затраты времени, обусловленные влиянием остальных неоптимизируемых показателей качества на время роспуска. Для нахождения экстремума функции применен метод Бокса – Уилсона. В качестве исследуемых факторов выбраны параметры регулятора  $T_{ру}$  и  $K_{ру}$  и корректирующих цепей  $K_v$  и  $K_{рд}$ . Реализация матрицы планирования эксперимента также осуществлена для 16 вариантов системы.

Исследования показали, что использование метода движения по градиенту обеспечивает повышение качества переходных процессов. Получены расчетные значения перерегулирования, составляющие 9 %, что меньше установленных.

Получено 24.10.2017

**V. V. Burchankou.** Optimization of parameters regulation of speed for the hump locomotives.

The parameters of the diesel locomotive power chaine influencing the locomotive speed have determined. The choice of control laws has been implemented for the system of automatic speed control of hump locomotive. Optimization of parameters of speed regulators of a dairy locomotive has made.

**Выводы.** Предложенный метод оптимизации параметров САРС горочного тепловоза позволяет обеспечить следующие показатели качества: перерегулирование не превышает 10 %; погрешность регулирования скорости движения вагонов составляет 5 %; среднее число переключений позиций регулятора дизеля на роспуск одного состава равно 6,17; системой управления реализуются ускорения 0,05–0,07 м/с<sup>2</sup>; расход топлива уменьшен на 10 %. Использование системы САРС на горочном тепловозе повышает перерабатывающую способность сортировочной горки на 290 в сутки.

#### Список литературы

- 1 **Бурченков, В. В.** Особенности функционирования средств автоматического управления скоростью надвига и роспуска составов на сортировочной горке / В. В. Бурченков // Проблемы и перспективы развития устройств автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники на железнодорожном транспорте. – Ростов н/Д : РГУПС. – 1999. – С. 21–24.
- 2 **Назаров, Л. С.** Маневровые тепловозы / Л. С. Назаров. – М. : Транспорт, 1977. – 404 с.
- 3 **Баранов, Л. А.** Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов [и др.]. – М. : Транспорт, 1990. – 272 с.
- 4 **Бурченков, В. В.** Исследование регулятора скорости тепловоза ЧМЭЗМ в условиях надвига и роспуска составов / В. В. Бурченков // Вестник ВНИИЖТ. – 1982. – № 6. – С. 25–28.