

УДК 621.3.07

Ю. В. ЧЕРНЯК, кандидат технических наук, В. А. ГАТЧЕНКО, кандидат технических наук, С. В. КАРАЩУК, преподаватель, Государственный университет инфраструктуры и технологий, г. Киев, Украина

## МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Построена математическая модель тягового привода электровоза постоянного тока с широтно-импульсной системой регулирования двигателей. Составлено уравнение баланса напряжения тягового электродвигателя с широтно-импульсной системой регулирования. Получены зависимости электровоза с широтно-импульсной системой регулирования при последовательно-параллельном и параллельном соединениях от скорости, а также тяговая характеристика электровоза ВЛ11М с широтно-импульсной системой регулирования при различных режимах разгона.

**В** условиях тенденции роста стоимости энергоносителей возникает вопрос об экономичности использования топливно-энергетических ресурсов подвижным составом. Эксплуатационный парк электровозов постоянного тока состоит из локомотивов, работающих с устаревшей реостатно-контакторной системой управления (РКСУ). При движении на неходовых позициях электроподвижной состав (ЭПС) постоянного тока с РКСУ тратит на реостатах часть энергии. В процессе пуска, особенно для тяжеловесов и тяжелых профилей пути, важно проанализировать эффективность и сравнить затраты электроэнергии на достижение электровозом расчетной скорости при применении ослабления возбуждения на промежуточных ходовых позициях и без применения (полное поле).

В работах [1, 2] проанализированы режимы работы ЭПС и обоснована необходимость повышения его КПД, эффективность использования электроэнергии ЭПС и рассмотрены различные системы тягового электропривода, применяемые на железнодорожном транспорте. В работе [3] построена математическая модель для определения параметров движения поезда на реостатных и ходовых позициях электровоза при РКСУ. Однако большие потери электроэнергии в реостатах ставят задачу поиска другой системы регулирования напряжения двигателей, например, широтно-импульсной.

Таким образом, задача создания математической модели тягового привода электровоза постоянного тока с широтно-импульсным регулированием (ШИР) напряжения тяговых электродвигателей является весьма актуальной.

Выход на расчетную скорость электровоза при работе с импульсной системой регулирования возможен двумя путями: с постоянной и переменной частотами коммутации.

Последний метод позволит уменьшить величину индуктивности в цепи двигателя и потери на коммутацию полупроводниковых ключей.

Формула баланса напряжения при широтно-импульсном регулировании напряжения будет иметь вид

$$\frac{60\mu\nu}{3,6\pi D_k} = \frac{\delta U_{\text{кв}} - I_a r_{\text{тэд}}}{C_e \Phi(I_a)}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – передаточное число редуктора;  $\nu$  – скорость движения поезда;  $D_k$  – диаметр круга катания колесной

пары;  $C_e$  – конструкционная постоянная машины;  $U_{\text{кв}}$  – напряжение в контактной сети;  $r_{\text{тэд}}$  – активное сопротивление ТЭД;  $\delta$  – коэффициент относительного заполнения импульса напряжения;  $a_{\text{тэд}}$  – количество последовательно включенных ТЭД в зависимости от соединения;  $\Phi(I_a)$  – зависимость магнитного потока от тока намагничивания;  $I_a$  – ток тягового электродвигателя.

Коэффициент относительного заполнения импульса напряжения

$$\delta = \frac{t_{\text{вкл.}}}{T}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{вкл.}}$  – продолжительность состояния, при котором ключ замкнут;  $T$  – период импульсной модуляции сигнала.

Зависимость магнитного потока от тока намагничивания [3]

$$\Phi(I_a) = K_1 I_a + K_2 I_a^2 + K_3 I_a^3 + K_4 I_a^4, \quad (3)$$

где  $K_1 - K_4$  – коэффициенты аппроксимации.

Преобразуем уравнение баланса напряжения с учетом аппроксимации зависимости магнитного потока от тока якоря:

$$\frac{60\mu\nu}{3,6\pi D_k} = \frac{\delta U_{\text{кв}} - I_a r_{\text{тэд}}}{C_e (K_1 I_a + K_2 I_a^2 + K_3 I_a^3 + K_4 I_a^4)}. \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (4) к уравнению четвертого порядка:

$$3,6\pi D_k \left[ \frac{\delta U_{\text{кв}} - I_a r_{\text{тэд}}}{a_{\text{тэд}}} \right] = 60\mu\nu C_e (K_1 I_a + K_2 I_a^2 + K_3 I_a^3 + K_4 I_a^4) - 3,6\pi D_k \frac{\delta U_{\text{кв}}}{a_{\text{тэд}}} + I_a [3,6\pi D_k r_{\text{тэд}} + 60\mu\nu C_e K_1] + I_a^2 60\mu\nu C_e K_2 + I_a^3 60\mu\nu C_e K_3 + I_a^4 60\mu\nu C_e K_4 = 0. \quad (5)$$

Полученное уравнение четвертого порядка решаем численным методом полиномов Лаггера в среде программы MathCAD:

$$I_1(v, j) = \begin{bmatrix} -3,6\pi D_k \frac{\delta(v) U_{\text{кв}}}{a_{\text{тэд}}(j)} \\ 3,6\pi D_k r_{\text{тэд}} + 60\mu\nu C_e K_1 \\ 60\mu\nu C_e K_2 \\ 60\mu\nu C_e K_3 \\ 60\mu\nu C_e K_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Поскольку тактирование сигнала возможно только на параллельном и последовательно-параллельном соединении, то обозначим через коэффициент  $j$  схему соединения двигателей:

- $j = 1$  – последовательно-параллельное (СП);
- $j = 2$  – параллельное (П).

Коэффициент, учитывающий количество двигателей в последовательной цепи,

$$a_{\text{тэд}}(j) = \begin{cases} 4 & j = 1; \\ 2 & j = 2. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения полиномов четвертого порядка будут иметь несколько корней. Однако решению уравнения удовлетворяет только действительный (не комплексный) неотрицательный корень. Составим алгоритм выбора действительного положительного корня:

$$I_3(v, j) = \begin{cases} (I_2(v, j))_1 \quad (\text{Im}(I_2(v, j))_1 = 0 \wedge (I_2(v, j))_1 > 0; \\ (I_2(v, j))_2 \quad (\text{Im}(I_2(v, j))_2 = 0 \wedge (I_2(v, j))_2 > 0; \\ (I_2(v, j))_3 \quad (\text{Im}(I_2(v, j))_3 = 0 \wedge (I_2(v, j))_3 > 0; \\ (I_2(v, j))_4 \quad (\text{Im}(I_2(v, j))_4 = 0 \wedge (I_2(v, j))_4 > 0. \end{cases} \quad (8)$$

Ток электровоза

$$I_3 = \delta I_a. \quad (9)$$

В результате моделирования получена токовая характеристика электровоза ВЛ11м с ШИР напряжения ТЭД (рисунок 1).

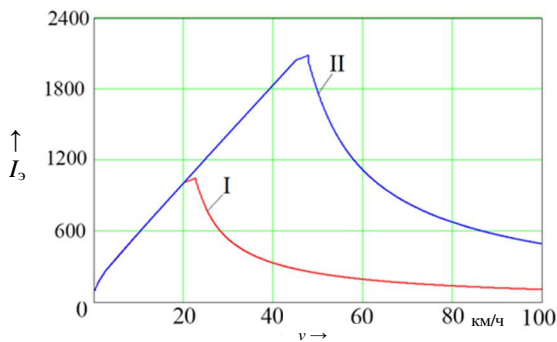


Рисунок 1 – Токовая характеристика электровоза ВЛ11м с ШИР напряжения ТЭД, полученная в результате моделирования: I – ток электровоза при СП соединении; II – ток электровоза при П соединении

Для построения тяговой характеристики электровоза ВЛ11м преобразуем формулу (12) [3] и определим силу тяги электровоза для данной модели с учетом ШИР:

$$F_k = m \frac{3,6 I_a \eta_{3,п} (\delta U_{к.с} - I_a r_{\text{тэд}})}{v}, \quad (10)$$

Получено 04.04.2018

**Yu. V. Chernyak, V. A. Gatchenko, S. V. Karaschuk.** Model of traction drive of the DC electric locomotive with pulse-width voltage regulation of traction motors.

The mathematical model of traction drive of an electric locomotive of a direct current with pulse-width system of engines regulation has been built. The balance equation of the traction motor voltage pulse width control system has been composed. Dependences of an electric locomotive with a pulse-width control system with series-parallel and parallel connections on the speed have been obtained. Traction characteristics of the electric locomotive VL11M with pulse-width control system under various modes of acceleration have been obtained.

где  $m$  – количество колесных пар электровоза;  $\eta_{3,п}$  – КПД зубчатой передачи.

Построена тяговая характеристика электровоза ВЛ11м с ШИР при различных режимах разгона (рисунок 2).

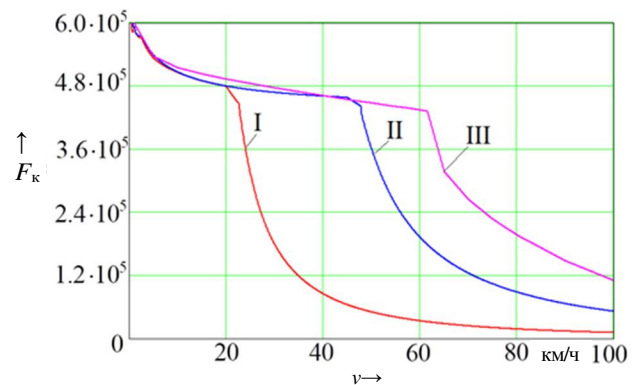


Рисунок 2 – Тяговая характеристика электровоза ВЛ11м с ШИР при различных режимах разгона, полученная в результате моделирования: I – при СП соединении; II – при П соединении; III – ограничение по сцеплению

Получено уравнение баланса напряжения тягового электродвигателя с ШИР с учетом аппроксимированной магнитной характеристики.

На основании математической модели были построены токовая и тяговая характеристики электровоза ВЛ11м с широтно-импульсной системой регулирования напряжения электродвигателей.

С учетом полученных характеристик возможно решение задачи определения эффективности такого вида тягового привода на электровозах постоянного тока.

#### Список литературы

- 1 Аналіз ефективності використання електроенергії системами тягового електроприводу ЕРС постійного струму / Ю. В. Черняк [та ін.] : зб. наук. праць Державного економіко-технологічного ун-ту транспорту М-ва освіти і науки України. Сер. Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 28. – С. 5–12.
- 2 Карашук, С. В. Аналіз систем тягового електроприводу електрорухомого складу / С. В. Карашук : зб. наук. праць Державного економіко-технологічного ун-ту транспорту М-ва освіти і науки України. Сер. Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 29. – С. 96–106.
- 3 Черняк, Ю. В. Математична модель тягового електроприводу електровоза постійного струму / Ю. В. Черняк, В. О. Гатченко, С. В. Карашук : зб. наук. праць Державного економіко-технологічного університету транспорту М-ва освіти і науки України. Сер. Транспортні системи і технології. – 2017. – Вип. 30. – С. 172–183.