

Если предположить, что локомотив № 388 будет совершать поездки только с составами массой более 6000 т, а локомотив № 196 с составами массой не более 2000 т, то последний окажется более экономичным.

Аналогичные результаты получены при сравнении результатов работы локомотивных бригад.

Таким образом, можно утверждать, что при действующей на Белорусской ж. д. системе нормирования расхода топлива на тягу поездов на выполнение нормы влияют не только квалификация локомотивной бригады и теплотехническое состояние тепловоза, но и условия работы локомотива. А это значит, что оценка работы локомотивной бригады по топливосбережению и теплотехнического состояния тепловоза не вполне объективна. Следовательно, требуется совершенствование методики расчёта нормы с тем, чтобы на выполнение нормы расхода топлива влияли только работа локомотивной бригады и теплотехническое состояние тепловоза.

Одним из возможных путей совершенствования системы нормирования может быть применение для расчёта нормы расхода топлива моделей, построенных на данных из маршрутов машиниста за предшествующий период (месяц, квартал, год) [1].

#### Список литературы

1 Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М. : Маршрут, 2005. – С. 399–409.

УДК 621.313.33

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

О. Р. ХАМИДОВ, Н. С. ЗАЙНИДИНОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Наиболее адекватной является математическая модель в трехфазных координатах, которые описывают процесс преобразования электроэнергии в локомотивном асинхронном тяговом электродвигателе с короткозамкнутым ротором в переходных и стационарных режимах [1–3, 8].

На рисунке 1 представлена имитационная модель АТЭД, собранного в программной среде Matlab/Simulink, в естественных координатах.

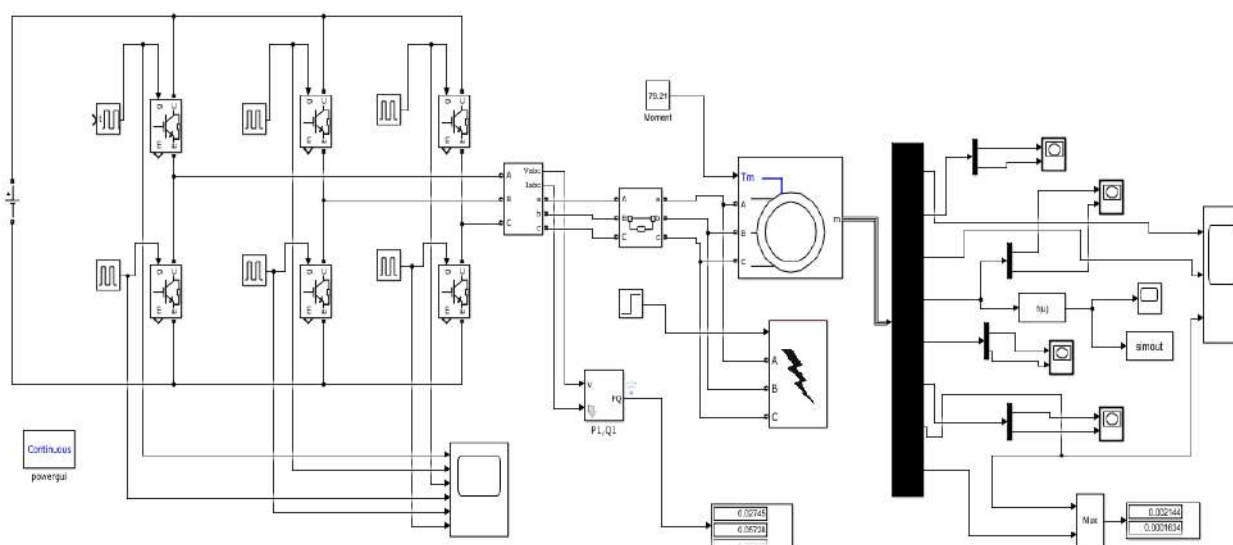


Рисунок 1 – Моделирование АТЭД в программной среде MATLAB/Simulink 2018b

Диагностика АТЭД локомотивов заключается в решении задачи классификации, когда определяется принадлежность входного набора данных (диагностических признаков) к одному из нескольких заранее известных классов технического состояния АТЭД. Нейросетевая модель для диагностики АТЭД локомотивов приведена на рисунке 2 [2–9].

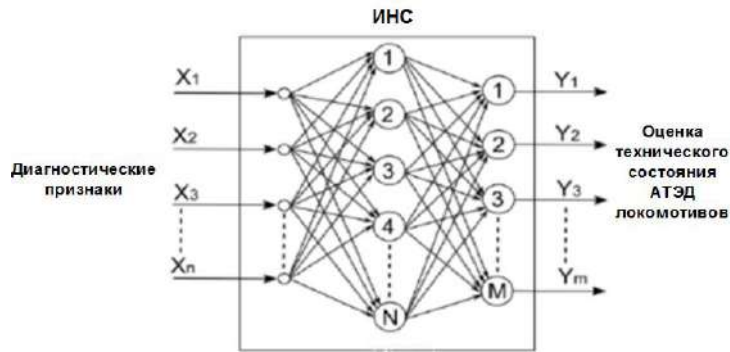


Рисунок 2 – Нейросетевая модель для оценки технического состояния АТЭД локомотивов

Построение математической модели АТЭД происходит в таком порядке.

Матрицы напряжений и токов, а также потокосцепления имеют следующий вид [1–3,6–9]:

$$[U_{ABCS}] = [I_{ABCS}] \cdot [R_{ABCS}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ABCS}], \quad (1)$$

$$[U_{ABCR}] = [I_{ABCR}] \cdot [R_{ABCR}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{ABCR}], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Ss} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{Rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$[L_{Ss}] = \begin{bmatrix} L_{AS} & M_{ABS} & M_{BCS} \\ M_{ABS} & L_{BS} & M_{BCS} \\ M_{ACS} & M_{BCS} & L_{CS} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$[L_{Rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{abr} & M_{bcr} \\ M_{abr} & L_{br} & M_{bcr} \\ M_{acr} & M_{bcr} & L_{cr} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $L_{AS}, L_{BS}, L_{CS}$  – индуктивности фазы статора;  $L_{ar}, L_{br}, L_{cr}$  – индуктивности фазы ротора;  $M_{ABS}, M_{BCS}, M_{ACS}$  – взаимные индуктивности между фазами статора;  $M_{abr}, M_{bcr}, M_{acr}$  – взаимные индуктивности между фазами ротора.

Взаимные индуктивности фаз статора с обмотками ротора и обмоток ротора с фазами статора

$$[L_{SR}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{SRAa} \cos \theta & L_{SRAb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRAc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{SRAb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRBb} \cos \theta & L_{SRBc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{SRCa} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRCb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRCc} \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$[L_{RS}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{RSAa} \cos \theta & L_{RSAb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSAc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{RSBa} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSBb} \cos \theta & L_{RSBc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{RSCa} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSCb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSCc} \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$L_{Ss} = L_{sl} + L_{sm}. \quad (8)$$

$$M_s = -0,5L_{ms}. \quad (9)$$

$$L_{Rr} = L_{rl} + L_{rm}. \quad (10)$$

$$M_r = -0,5L_{mr}. \quad (11)$$

Электромагнитный момент АТЭД локомотивов равен частной производной по геометрическому углу от общего запаса электромагнитной энергии АТЭД и может быть представлен следующим образом [2, 6–9]:

$$M_e = -GL_{sr} \begin{bmatrix} I_{sa} \left( I_{ra} \sin \theta + I_{ra} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rc} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right) + \\ + I_{sb} \left( I_{ra} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rb} \sin \theta + I_{rc} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) + \\ + I_{sc} \left( I_{rb} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rb} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rc} \sin \theta \right) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Уравнение движения привода имеет следующий вид:

$$M_e \pm M_c = \frac{\sum J}{Z_p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + f_v \omega_r. \quad (13)$$

Диагностика АТЭД локомотивов заключается в решении задачи классификации, когда определяется принадлежность входного набора данных (диагностических признаков) к одному из нескольких заранее известных классов технического состояния АТЭД.

Для обработки (реализации) данных, полученных при выполнении математического моделирования и оценки технического состояния АТЭД локомотивов была использована ИНС пакета программ Simulink/Matlab. На рисунке 3 представлены спектры асинхронного электродвигателя.

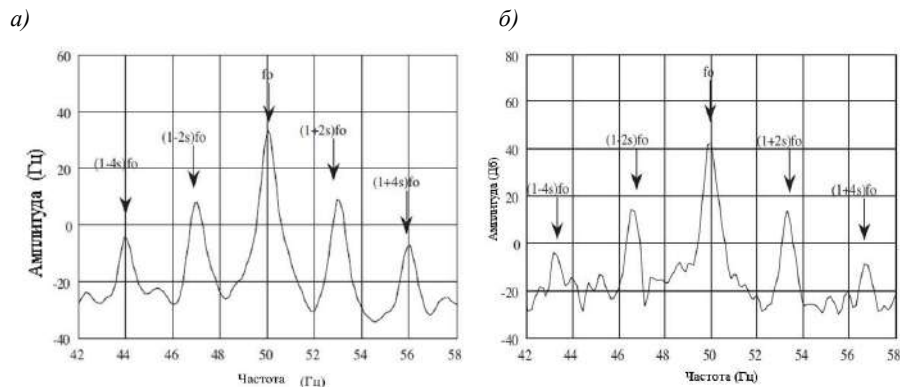


Рисунок 3 – Спектр тока при полной нагрузке:

а – одного обрыва стержня ротора; б – с двумя обрывами стержней, показывающими  $(1 \pm 2s)fs$  и  $(1 \pm 4s)fs$  боковых полос

Из рисунков 1–3 видно, что собранная трехфазная модель асинхронного тягового двигателя в программной среде Matlab Simulink позволяет анализировать несимметричные режимы переменных состояния электродвигателя.

Таким образом, показано, что искусственные сети являются мощным и доступным инструментом, способным давать достоверные результаты при технической диагностике асинхронных тяговых электродвигателей подвижного состава. Представленная математическая модель локомотивных асинхронных электродвигателей в трехфазной системе координат позволяет максимально достоверно описать физические процессы при повреждении АТЭД.

#### Список литературы

- 1 **Хамидов, О. Р.** Математическая модель вибровозмущающих сил локомотивного асинхронного электродвигателя / О. Р. Хамидов, М. Н. Панченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 4 (37). – С. 60–67.
- 2 Аппарат искусственных нейронных сетей для диагностики современного локомотива / А. В. Грищенко [и др.] // Локомотив. – 2012. – № 7. – С. 36–40.
- 3 **Хамидов, О. Р.** Разработка методики комплексного диагностирования асинхронного тягового электродвигателя подвижного состава железнодорожного транспорта / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференции ГНИИ «Нацразвитие»: сб. избранных статей. – 2017. – С. 32–39.
- 4 Использование нейро-нечетких диагностических моделей при оценке технического состояния электрооборудования тепловоза / А. В. Агунов [и др.] // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 14–18.
- 5 **Хамидов, О. Р.** Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов серии «UZ-EL» средствами вибродиагностики / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференции ГНИИ «Нацразвитие». – 2017. – С. 13–19.
- 6 **Хамидов, О. Р.** Вибродиагностика повреждения подшипников качения локомотивных асинхронных электродвигателей / О. Р. Хамидов, А. В. Грищенко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты // VIII Международная научно-техническая конференция, Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 3–7 июля. – 2013. – С. 174–176.
- 7 **Grishchenko, A. V.** Diagnostics of the Technical Condition of Rolling Bearings of Asynchronous Traction Motors of Locomotives Based on Data Mining / A. V. Grishchenko // Russ. Electr. Engin. – 2020. – Vol. 91. – P. 593–596. – DOI: 10.3103/S1068371220100119
- 8 **Djanikulov, A. T.** Modeling of rotational oscillations in a diesel locomotive wheel-motor block / A. T. Djanikulov, Sh. I. Mamaev, O. T. Kasimov // Journal of Physics: Conference Series. ICMSIT-II 2021, IOP Publishing. – 1889 (2021) 022017. – DOI:10.1088/1742-6596/1889/2/022017.
- 9 **Kasimov, O. T.** Causes of rolling stock brake equipment failures. / O. T. Kasimov, Sh. I. Mamaev, A. V. Grishchenko // Journal of Technical science and innovation. – 2021. – No. 2. – P. 303–307. ISSN 2227-1031 (Print) ISSN 2414-0392 (Online).

УДК 656.22

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДОВ

*О. С. ЧАГАНОВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Одним из важных вопросов, связанных с безопасностью движения поездов на железнодорожном транспорте, является определение сил сопротивления движению подвижного состава. В настоящее время расчет этих сил производится по различным методикам. Анализ современных исследований по креплению железнодорожных составов на станционных путях выявил, что данный вопрос актуален из-за несовершенства существующих нормативных документов.

На территории стран, входящих в Организацию сотрудничества железных дорог (ОСЖД), используются Правила тяговых расчетов [1], в соответствии с которыми на состав действует сила сопротивления, определяемая выражением

$$W = \sum_{j=1}^k W_j = \sum_{j=1}^k w_{oj}'' Q_{\text{ваг}} g, \quad (1)$$

где  $w_{oj}''$  – основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов на звеньевом пути для 4-осных вагонов на роликовых подшипниках ( $q_{o4} > 6$  т),

$$w_{oj}'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{o4}}, \quad (2)$$

$q_{o4}$  – осевая нагрузка четырехосных вагонов, т/ось,