

ОМСК

2018

# ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 10 - 7 (25)

ИЦ «ОРКА»

ЭЛЕКТРОННОЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

**«Вестник современных исследований»**

Выпуск № 10-7 (25) (октябрь, 2018).

**ISSN 2541-8300**

Сайт: <http://orcacenter.ru/journal>

Издание предназначено для научных и педагогических работников, преподавателей, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Журнал выпускается по материалам международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований».

Информация об опубликованных статьях предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования – **РИНЦ** (на основании договора о включении журнала в РИНЦ от 15.02.2017 г. №79-02/2017).

За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей. Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых статей.

Учредитель и издатель: Научный центр «Орка», 644116, г. Омск, ул. Герцена, 65/1, тел. 8-950-950-21-18, <http://orcacenter.ru>, [info@orcacenter.ru](mailto:info@orcacenter.ru)

<b>Ромашко А.В., Воробьев С.П.</b> Программные решения технологии Hadoop используемые в геоинформационных системах.....	237
<b>Султанов Д.А., Мехтиев Д.С.</b> Распределение долгоживущих изотопов урана и радия на бибиэбатском нефтяном месторождении Азербайджана .....	240
<b>Таланов Р. М.</b> Инженеры разрабатывают первый метод управления наномоторами.....	247
<b>Тарасова Ю.А.</b> К вопросу о привлечении специализированных организаций на право оказания юридических услуг при ликвидации кредитных учреждений .....	249
<b>Терехин С.В.</b> Анализ параметров освобождения внутренней полости нефтепровода от нефти.....	251
<b>Толстова И.С., Горлов А.А.</b> Разработка информационной подсистемы автоматизации севооборота .....	253
<b>Трифорова Т.Ю., Сазонова К.Г.</b> Специфика процесса разработки мобильного приложения.....	258
<b>Туркина А.В.</b> Выделение асфальтенов на месторождениях высоковязкой нефти как способ снижения отложений в нефтепроводах и резервуарах .....	262
<b>Тухбатуллина Д.И., Рашитова Р.А., Егорова П.В., Гришина В.В., Аухадеев А.Э.</b> Универсальный метод аппроксимации характеристик тягового электрооборудования электротехнических комплексов и систем .....	264
<b>Шумков А.П., Чиркова Ю.Н.</b> Разработка новых высокооктановых компонентов моторного топлива .....	267

**Универсальный метод аппроксимации характеристик тягового электрооборудования электротехнических комплексов и систем**

Тухбатуллина Д.И., Рашитова Р.А., Егорова П.В., Гришина В.В., Аухадеев А.Э.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Описан универсальный метод аппроксимации нелинейных характеристик тягового электрооборудования электротехнических комплексов и систем транспортного назначения, в котором предлагается использовать для получения аппроксимирующей функции полином второго порядка, что позволяет обеспечить при заданной величине ошибки высокое быстродействие расчетов режимов работы.

*Ключевые слова:* электротехнические комплексы и системы, тяговое электрооборудование, полиномиальная аппроксимация нелинейных характеристик.

В настоящее время выбор и обоснование технологических режимов тягового электрооборудования (ТЭО) электротехнических комплексов и систем транспортного назначения все чаще производится по результатам математического моделирования работы объекта исследования для конкретных эксплуатационных условий. При этом сложность исходной модели исследуемого объекта или некорректно подобранный метод и способ математической формализации его основных характеристик может существенно увеличить машинное время выполнения вычислительной работы [1]. Особенно остро данная проблема стоит при разработке бортовых систем автоматизированного управления режимами движения электроподвижного состава (ЭПС), задача которых в реальном времени на основании получаемой информации об условиях эксплуатации рассчитать рациональные режим работы ТЭО [2].

Анализ научной и нормативно-технической литературы [2-5 и др.] показывает, что большинство методов математической формализации нелинейных характеристик тягового электрооборудования основываются на использовании аппроксимирующей функции в виде полинома 3го и выше порядка, что существенно усложняет математическую модель движения электроподвижного состава (ЭПС), в общем виде представленную выражением:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = F_{TЭД}(v) \cdot n = F(v), \quad (1)$$

где  $(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции,  $m$  – масса ЭПС,  $F_{TЭД}(v)$  – нелинейная характеристика тягового электродвигателя (в общем случае ТЭО),  $n$  – число тяговых двигателей ЭПС,  $F(v)$  – тяговая характеристика ЭПС,  $v$  – скорость движения ЭПС.

Исследования [6, 7] показывают, что нелинейное дифференциальное уравнение (1) может иметь точное аналитическое решение в случае представления правой части полиномом второго порядка, определенным во всем диапазоне возможных скоростей  $0 - v_{TECH}$  и в общем виде математически формализованного выражением:

$$F(v) = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 \quad (2)$$

Описываемый универсальный метод аппроксимации нелинейной характеристики  $F(v)$  полиномом 2го порядка основывается на методе наименьших квадратов (МНК), при это достаточно прост и позволяет обеспечить при заданной величине ошибки высокое быстродействие расчетов [6].

Чтобы определить коэффициенты аппроксимирующего выражения (2), коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  следует выбирать таким образом, чтобы невязка (сумма ошибок) была минимальной:

$$\psi = \sum_{n=1}^m [f(v_n, a_0, a_1, a_2) - \varphi(v_n)]^2 \rightarrow \min ,$$

где  $\varphi(v_n)$  – экспериментально снятая кривая  $F_{TЭД}(v) \cdot n$ ;  $m$  – количество выбранных точек (относительно невелико, но достаточное для того, чтобы особенности характеристики были учтены в полной мере).

После выбора  $m$  точек приравнивание к нулю производной от суммы ( $\psi$ ) по отдельным коэффициентам дает необходимое число уравнений в системе для определения коэффициентов  $a_0, a_1, a_2$ , а именно:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{da_0} &= \sum_{n=1}^m 2[(a_0 + a_1 v_n + a_2 v_n^2) - \varphi(v_n)] = 0, \\ \frac{d\psi}{da_1} &= \sum_{n=1}^m 2[(a_0 + a_1 v_n + a_2 v_n^2) - \varphi(v_n)] \cdot v_n = 0, \\ \frac{d\psi}{da_2} &= \sum_{n=1}^m 2[(a_0 + a_1 v_n + a_2 v_n^2) - \varphi(v_n)] \cdot v_n^2 = 0, \end{aligned}$$

Получаем систему из 3-х уравнений с 3-мя неизвестными:

$$\begin{aligned} m \cdot a_0 + a_1 \sum_{n=1}^m v_n + a_2 \sum_{n=1}^m v_n^2 &= \sum_{n=1}^m \varphi(v_n), \\ a_0 \sum_{n=1}^m v_n + a_1 \sum_{n=1}^m v_n^2 + a_2 \sum_{n=1}^m v_n^3 &= \sum_{n=1}^m v_n \cdot \varphi(v_n), \\ a_0 \sum_{n=1}^m v_n^2 + a_1 \sum_{n=1}^m v_n^3 + a_2 \sum_{n=1}^m v_n^4 &= \sum_{n=1}^m v_n^2 \cdot \varphi(v_n). \end{aligned} \quad (3)$$

Решая эту систему линейных уравнений, находим необходимые коэффициенты  $a_0, a_1, a_2$  полинома второго порядка, которые являются искомыми параметрами аналитического выражения. Запишем систему линейных уравнений (3) в более компактном виде:

$$\begin{aligned} b_{00}a_0 + b_{01}a_1 + b_{02}a_2 &= c_0, \\ b_{10}a_0 + b_{11}a_1 + b_{12}a_2 &= c_1, \\ b_{20}a_0 + b_{21}a_1 + b_{22}a_2 &= c_2. \end{aligned} \quad (4)$$

где  $b_{kl} = \sum_{n=1}^m v_n^{k+l}$ ,  $c_k = \sum_{n=1}^m \varphi(v_n) \cdot v_n^k$ ;  $k, l = 0, 1, 2$

$$\begin{aligned} b_{00} &= m, & b_{01} &= b_{01} = \sum_{n=1}^m v_n, & b_{02} &= b_{20} = \sum_{n=1}^m v_n^2, \\ b_{11} &= \sum_{n=1}^m v_n^2, & b_{12} &= b_{21} = \sum_{n=1}^m v_n^3, & b_{22} &= \sum_{n=1}^m v_n^4, \\ c_0 &= \sum_{n=1}^m \varphi(v_n), & c_1 &= \sum_{n=1}^m v_n \cdot \varphi(v_n), & c_2 &= \sum_{n=1}^m v_n^2 \cdot \varphi(v_n). \end{aligned}$$

Данную систему решаем методом Крамера:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} b_{00} & b_{01} & b_{02} \\ b_{10} & b_{11} & b_{12} \\ b_{20} & b_{21} & b_{22} \end{vmatrix}, & \Delta_1 &= \begin{vmatrix} c_0 & b_{01} & b_{02} \\ c_1 & b_{11} & b_{12} \\ c_2 & b_{21} & b_{22} \end{vmatrix}, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} b_{00} & c_0 & b_{02} \\ b_{10} & c_1 & b_{12} \\ b_{20} & c_2 & b_{22} \end{vmatrix}, & \Delta_3 &= \begin{vmatrix} b_{00} & b_{01} & c_0 \\ b_{10} & b_{11} & c_1 \\ b_{20} & b_{21} & c_2 \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

$$a_0 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad a_1 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad a_2 = \frac{\Delta_3}{\Delta}.$$

Найденные коэффициенты подставляем в выражение (2) и далее используем в процессе расчетов.

Для повышения точности аппроксимации тяговой характеристики ЭПС полиномом второго порядка  $F(v)$  разбивается на две части. Значение скорости движения, при которой тяговая характеристика  $F(v)$  делится на две части, определяется скоростью при которой происходит переход на характеристики ТЭО  $F_{ТЭД}(v)$  другой ступени уровня ослабления возбуждения. При этом средняя погрешность аппроксимации одной части кривой, подсчитанной по формуле, не превышает 5% [4].

$$\delta = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{F_i - F_i(v)}{F_i} \right|,$$

где  $F_i$  - значение функции экспериментального графика,  $F_i(v)$  - значение функции аппроксимирующего полинома.

Авторами представлен универсальный метод полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик ТЭО, особенностью которого является использование для получения аппроксимирующей тяговую характеристику ЭПС функции  $F(v)$  полинома второго порядка, что позволяет обеспечить при этом достаточную близость функции  $F_{ТЭД}(v) \cdot n$  и значительное сокращение машинного времени при математических расчетах режимов работы ЭПС. Данный метод может быть использован в вычислительных алгоритмах бортовых систем автоматизированного управления режимами движения ЭПС, что позволит на основании потока информации об условиях эксплуатации быстро и с заданной точностью рассчитать рациональные режим работы ТЭО.

### Список литературы

1. Носач В.В. Решения задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М.: МИКАП, 1994. 382 с.
2. Баранов Л.А., Головичер Я.М., Ерофеев Е.В., Максимов В.М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1990. 272 с.
3. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
4. Деев В.В., Ильин Г.А., Афонин Г.С. Тяга поездов. М.: Транспорт, 1987. 264 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
6. Аухадеев А.Э. Моделирование режимов тяги силового электрооборудования электрического транспорта. Казань: Изд-во КГЭУ, 2006. 156 с.
7. Киснеева Л.Н., Аухадеев А.Э., Рылов Ю.А., Фиккиев Н.Р. Развитие теоретических основ методов решения дифференциального уравнения движения электроподвижного состава // Вестник научных конференций. 2016. № 12-4 (16). С. 79-81.

© А.Э. Аухадеев, 2018