



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

Н.А. Малёв¹, А.И. Мухаметшин¹, О.В. Погодицкий¹, А.Г. Городнов²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия
maleev@mail.ru

Резюме: Задача оценки и анализа переходных режимов электромеханических преобразователей с получением их математических моделей, с высокой точностью соответствующих объектам исследования, является актуальной на этапах проектирования и эксплуатации. Программные продукты LabView, MatLab Simulink и другие открывают широкие возможности для решения поставленной задачи и позволяют получить достоверные результаты. В работе проведена экспериментально-аналитическая оценка переходных режимов двигателя постоянного тока на базе установки для исследования электрических машин. На основании полученных результатов проведены аппроксимация графиков переходных процессов с применением метода наименьших квадратов и подбор аппроксимирующего полинома соответствующего порядка с наибольшим приближением к динамическим свойствам исследуемого объекта. Произведена оценка динамической точности процесса аппроксимации. Для оценки погрешности применен критерий минимума интеграла от квадрата невязки. Проведенные эксперимент, моделирование переходных процессов и анализ полученных графиков показывают, что полученная математическая модель с большой степенью точности соответствует данным эксперимента. Данное обстоятельство позволяет использовать предложенный метод для контроля вариаций параметров исследуемого объекта и их экспериментально-аналитической оценки на этапах проектирования и контроля функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь постоянного тока, аппроксимация, метод наименьших квадратов, экспериментальная установка, невязка, идентификация.

Для цитирования: Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Городнов А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.113-122. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122.

**EXPERIMENTAL-ANALYTICAL IDENTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL
OF A DC MOTOR USING THE LEAST SQUARES METHOD**

NA. Malev¹, AI. Mukhametshin¹, OV. Pogoditsky¹, AG. Gorodnov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: The urgency of the problem lies in the formation of mathematical models of electromechanical converters corresponding to the objects of study with high accuracy. An experimental-analytical assessment of transient modes of a DC motor based on an installation for the study of electrical machines has been carried out. Based on the results obtained, an approximation of transient process graphs was carried out using the least squares method and an

approximate polynomial of the corresponding order was selected with the closest imminence to the dynamic properties of the object under study.

Keywords: *electromechanical converter of direct current, approximation, least squares method, experimental setup, discrepancy, identification.*

For citation: Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, Gorodnov AG. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019; 21(4):113-122. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122.

Введение

При решении задач анализа и синтеза реальных физических объектов и процессов с применением математических методов возникает необходимость построения соответствующей изучаемому явлению модели. Следует определиться со структурой исследуемого объекта и видом пригодных для его описания моделей, и затем оценить некоторые неизвестные параметры в принятом к рассмотрению виде математической модели [1–3]. Искомые оценки неизвестных параметров можно определить путем обработки входных и выходных сигналов исследуемого объекта на этапе опытного исследования, что составляет задачу экспериментально-аналитической идентификации [4–6]. В результате идентификации создается адекватная математическая модель, позволяющая использовать широкий класс математических методов анализа и синтеза. В этой связи разработка и модернизация способов и алгоритмов идентификации играют важную роль как в теоретических исследованиях, так и в инженерной практике.

Область применения указанных алгоритмов устойчиво растет и особенно важное место они занимают на всех этапах создания, испытаний опытных образцов и эксплуатации объектов электротехнических систем, в частности, электромеханических преобразователей в составе рабочих комплексов [7, 8, 9].

Для решения данного класса задач широкое применение находит метод наименьших квадратов (МНК), особенности применения которого в отношении динамических объектов освещены в соответствующей литературе [1, 4, 11]. Особый интерес представляет решение задач идентификации объектов, динамика которых описывается непрерывными системами дифференциальных уравнений, а измерения производятся в дискретные моменты времени, что соответствует обширному классу прикладных задач [10, 12, 13, 14].

Данная работа посвящена экспериментально-аналитической идентификации математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока.

В качестве объекта исследования рассматривался двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г. Паспортные данные двигателя представлены в табл. 1 [15].

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 4ПБ112М2Г

$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	$\eta_{ном}, \%$	$n_{ном}, об/мин$	$2p$	$n_{max}, об/мин$	$J_{ном}, кг \cdot м^2$
220	3	16,2	80	3000	2	4000	0,0235

Методы

Дальнейшее исследование проводилось с применением экспериментальной установки. Установка содержит двигатель постоянного тока (ДПТ) и асинхронный двигатель (АД). Питание ДПТ обеспечивается от четырехквadrантного компактного тиристорного преобразователя постоянного тока бескорпусного исполнения с функцией рекуперации энергии в сеть типа *SPRINT ELECTRIC 3600XRi*. Информация о выходной координате – скорости вращения – поступает с установленного на валу двигателя датчика скорости – тахогенератора с крутизной статической характеристики 20 мВ·мин. Сигнал с тахогенератора поступает на блок согласования, представляющий собой делитель напряжения с коэффициентом передачи 60:1, и затем – на вход восьмиканального последовательного аналогово-цифрового преобразователя *NI 4472* с частотой дискретизации 20 кГц. АЦП подключен к шине *PCI* персонального компьютера.

Программная часть для сбора данных с измерительных каналов испытательного стенда реализована в среде графического программирования *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)*, разработанной компанией *National Instruments* [16–18]. Для анализа и последующей обработки данных используется набор функциональных библиотек. Взаимодействие с оператором осуществляется с помощью интуитивно понятного и сравнительно простого в программировании графического интерфейса с применением языка *G*. С помощью программ-драйверов *LabVIEW* может взаимодействовать с различными платами ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, а также со специализированными измерительными приборами (осциллографы, анализаторы спектра, генераторы сигналов и т.д.).

Экспериментальные замеры переходных процессов $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ при пуске двигателя постоянного тока осуществлялись при отсоединенном АД. Результаты эксперимента при пуске вхолостую при номинальных значениях параметров якорной цепи показаны на рис. 1 в виде усредненной зависимости.

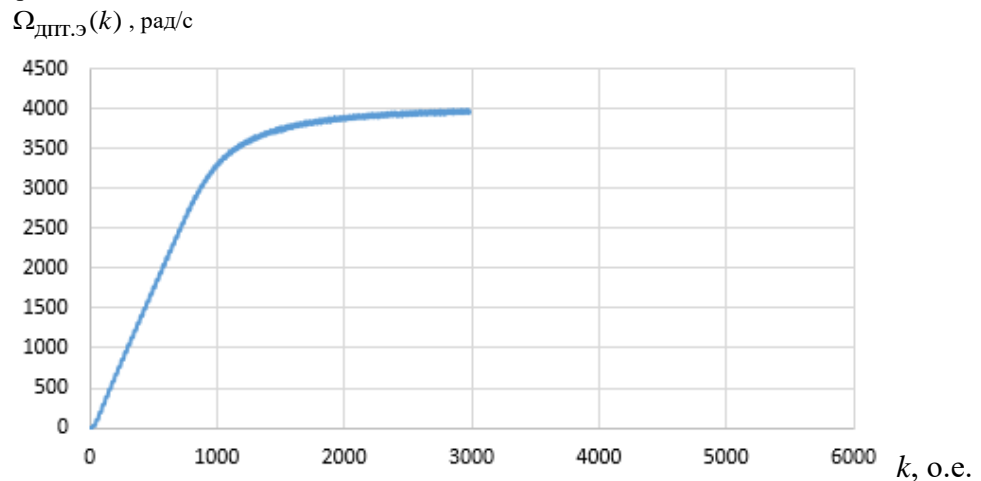


Рис. 1. Усредненная зависимость $\Omega_{\text{дпт.э}}(k)$

Полученная зависимость построена в программной среде *Excel* и позволяет оценить качество переходного процесса. В данном случае процесс является аperiodическим.

Следует отметить, что для обработки результатов эксперимента также в среде *Excel* применена программа, обеспечивающая рациональный выбор количества экспериментальных точек, не влияющий на снижение точности результатов.

Экспериментальная зависимость $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ (см. рис. 1) характеризуется флуктуациями измеряемой величины. Для их устранения была применена аппроксимация полученных данных методом наименьших квадратов с помощью оператора *polyfit* языка *MatLab*.

Зависимость $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ представлена массивами $t = \{N \times 1 \text{ double}\}$, $v = \{N \times 1 \text{ double}\}$, где $N = 2980$. Задача аппроксимации экспериментальных данных

$$(t_i, v_i)_{i=1,2,\dots,N} \quad (1)$$

полиномом степени n

$$p^{(n)}(t) = p_1 t^n + p_2 t^{n-1} + \dots + p_n t + p_{n+1} = \sum_{k=1}^{n+1} p_k t^{n-k+1} \quad (2)$$

состоит в решении задачи минимизации

$$\min_{p_1, p_2, \dots, p_{n+1}} \sum_{i=1}^N \left(p^{(n)}(t_i) - v_i \right)^2 \quad (3)$$

Тогда определение аппроксимирующего полинома сводится к поиску минимума функции

$$F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1}) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^{n+1} p_k t^{n-k+1} - v_i \right)^2 \quad (4)$$

по переменным p_1, p_2, \dots, p_{n+1} .

Функция $F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})$ является квадратичной с неотрицательными коэффициентами, поэтому ее минимум достигается в точке, в которой выполняются условия

$$\begin{cases} \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_1} = 0; \\ \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F(p_1, p_2, \dots, p_{n+1})}{\partial p_{n+1}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Решение данной системы приводит к $(n+1)$ линейным алгебраическим уравнениям для вычисления коэффициентов p_1, p_2, \dots, p_{n+1} полинома n -ой степени:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \left(\sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} t_i^{n-k+1} \right) p_k = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} v_i, \quad j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (6)$$

или в матричной форме

$$A = pz \quad (7)$$

где $p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n+1} \end{bmatrix}$; $a_{jk} = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} t_i^{n-k+1}$; $z_j = \sum_{i=1}^N t_i^{n-j+1} v_i$; $j, k = 1, 2, \dots, n+1$.

Следует отметить, что оператор *polyfit*, в отличие от метода нормальных уравнений, предполагающего решение (7), реализует подход, более устойчивый к вычислительным ошибкам [1]. С этой целью формируется прямоугольная матрица V из N строк и $(n+1)$ -го столбца, элементами которой являются степени t_i :

$$V = \begin{bmatrix} t_1^n & t_1^{n-1} & \dots & t_1 & 1 \\ t_2^n & t_2^{n-1} & \dots & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ t_{N-1}^n & t_{N-1}^{n-1} & \dots & t_{N-1} & 1 \\ t_N^n & t_N^{n-1} & \dots & t_N & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матрица A системы (1) связана с матрицей V следующим образом:

$$A = V^T V. \quad (9)$$

Вектор z правой части (1) выражается через вектор $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{N-1} \\ v_N \end{bmatrix}$ как

$$z = V^T v \quad (10)$$

При выполнении функции *polyfit* определяется QR -разложение матрицы V на основе ортогональной матрицы Q и верхней треугольной матрицы R , таких, что $V = QR$. Затем система линейных уравнений

$$QRp = v \quad (11)$$

решается следующим образом: вычисляется $Q^T v$; решается система с верхней треугольной матрицей $Rp = Q^T v$ и находится вектор p , содержащий коэффициенты p_1, p_2, \dots, p_{n+1} искомого аппроксимирующего полинома.

Ошибка аппроксимации $e = \sum_{i=1}^N \left(p^{(n)}(t_i) - v_i \right)^2$ для найденного полинома $p^{(n)}(t) = p_1 t^n + p_2 t^{n-1} + \dots + p_n t + p_{n+1}$ вычисляется по формуле

$$e = \|v - Vp\|. \quad (12)$$

Результаты

Произведем вычисление аппроксимирующего полинома для экспериментальной зависимости $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ с применением следующей программы:

```
x1=[t]; % значения зависимости  $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$  по оси абсцисс;
y1=[v]; % значения зависимости  $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$  по оси ординат;
p=polyfit(x1,y1,6); % оператор, вычисляющий коэффициенты  $p$  полинома  $n$ -й степени для массивов  $t, v$  методом наименьших квадратов;
xx1=linspace(x1(1), x1(end), 100); % оператор, формирующий линейный массив размера 1 x 100, начальным и конечным элементами которого являются точки  $x1(1)$  и  $x1(end)$ ;
```

```
yy1=polyval(p, xx1); % оператор, вычисляющий значения полинома  $p^{(n)}(t)$  на области определения данных между  $x1(1)$  и  $x1(end)$ ;
```

```
plot(x1,y1,'-'.xx1,yy1)
```

```
p =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
78325.2549791148 -287389.565371582 403394.63004533
```

```
Columns 4 through 6
```

```
-259979.405235382 63988.1830483225 5610.87331077735
```

```
Column 7
```

```
3.95608900692515
```

В результате был определен полином шестого порядка:

$$\Omega_{\text{МНК}}(t) = 78325,255t^6 - 287389,565t^5 + 403394,63t^4 - 259979,405t^3 + 63988,183t^2 + 5610,873t + 3,956. \quad (13)$$

В целях уменьшения вычислительных погрешностей полиномиального приближения целесообразно применить нормализацию данных [23, 24], которая состоит в замене t_i на \hat{t}_i , вычисляемых по формуле

$$\hat{t}_i = \frac{t_i - \mu}{\sigma}, \quad (14)$$

где μ – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение. Данные величины вычисляются по следующим выражениям:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \mu)^2}. \quad (15)$$

Нормализация данных выполняется автоматически с помощью оператора *polyfit* при обращении к нему с тремя выходными аргументами. В третьем аргументе возвращается вектор из двух компонент, первой из которых является среднее значение μ , а второй – среднеквадратичное отклонение σ . Этот вектор используется при вычислении коэффициентов аппроксимирующего полинома с помощью оператора *polyval* и указывается в качестве четвертого аргумента. Чтобы пропустить третий входной аргумент оператора *polyval*, используется пустой массив. После нормализации данных получены следующие результаты:

$$\Omega_{\text{МНК}}^{\text{норм}}(t) = 41,037t^6 - 103,773t^5 - 124,456t^4 + 567,857t^3 - 587,983t^2 + 369,776t + 3753,96;$$

$$\mu = 0,492; \quad \sigma = 0,284.$$

Малое значение среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0,284$ говорит о том, что найденное решение можно считать хорошо обусловленным.

Графики зависимостей, полученных экспериментальным путем $\Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$ и с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов $\Omega_{\text{МНК}}(t)$, приведены на рис. 2.

$\Omega_{\text{дпт.э}}(t), \Omega_{\text{мнк}}(t), \text{рад/с}$

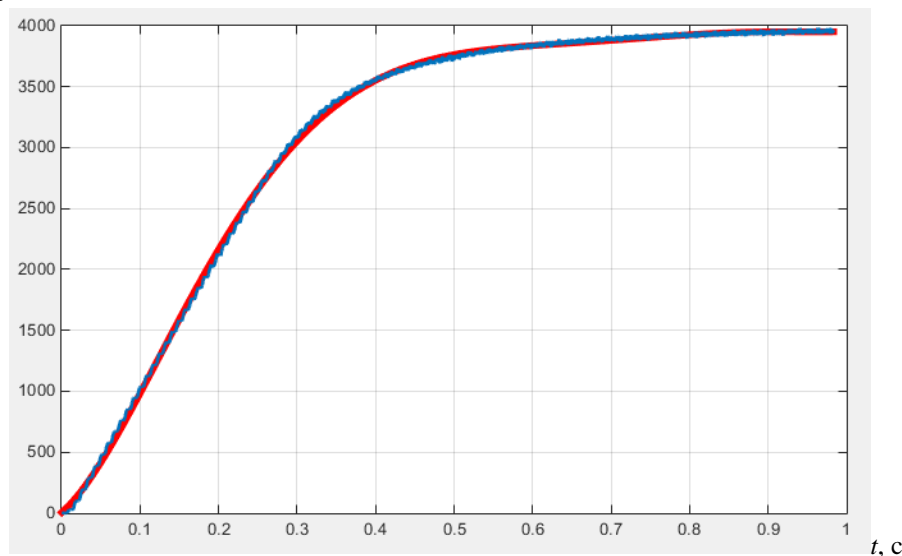


Рис. 2. Графики экспериментальной зависимости $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ (синий) и зависимости $\Omega_{\text{мнк}}(t)$ (красный), полученной при аппроксимации методом наименьших квадратов

Из рисунка видно, что аппроксимирующая кривая $\Omega_{\text{мнк}}(t)$ с высокой точностью повторяет экспериментальную кривую, что подтверждает достоверность полученных результатов. Дополнительные исследования, направленные на уменьшение порядка полинома, показали, что полиномы меньших порядков не дают требуемого приближения.

Обсуждение

Отметим, что в переходном режиме (см. рис. 2) имеют место несовпадения экспериментальной кривой $\Omega_{\text{дпт.э}}(t)$ и кривой $\Omega_{\text{мнк}}(t)$, полученной методом наименьших квадратов, что подтверждает наличие динамической погрешности. Оценку динамической погрешности произведем на основе вычисления невязки (разности) ϵ между показанными на рис. 2 кривыми с применением линейного интегрального критерия [19–21]:

$$Q_{\epsilon} = \int_0^{\tau} [\Omega_{\text{дпт.э}}(t) - \Omega_{\text{мнк}}(t)] dt, \quad (16)$$

где $\tau = 0,92$ с – время эксперимента.

Вычисление критерия Q_{ϵ} осуществляется при помощи *Simulink*-модели, показанной на рис. 3.

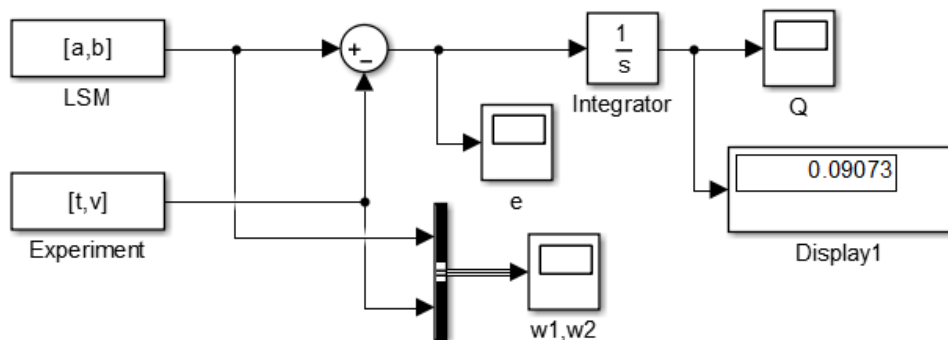


Рис. 3. Simulink-модель для оценки точности аппроксимации

Экспериментальные данные размещены в рабочей области *Workspace*, содержащей временной массив t и массив выходной координаты v в блоке *Experiment*. Блок *LSM* содержит массивы данных $a = \{N \times 1 \text{ double}\}$, $b = \{N \times 1 \text{ double}\}$, полученные в результате расчета методом наименьших квадратов. На выходе сумматора формируется сигнал невязки ϵ . На выходе блока *Integrator* формируется линейный интегральный критерий $Q(\epsilon)$, числовое значение которого фиксируется блоком *Display1* по окончании переходного

процесса. Переходные процессы на выходах блоков *LSM* и *Experiment* фиксируются в виде выходных координат $w1 = \Omega_{\text{МНК}}(t)$ и $w2 = \Omega_{\text{ДПТ.Э}}(t)$.

На рис. 4 показан график невязки ε .

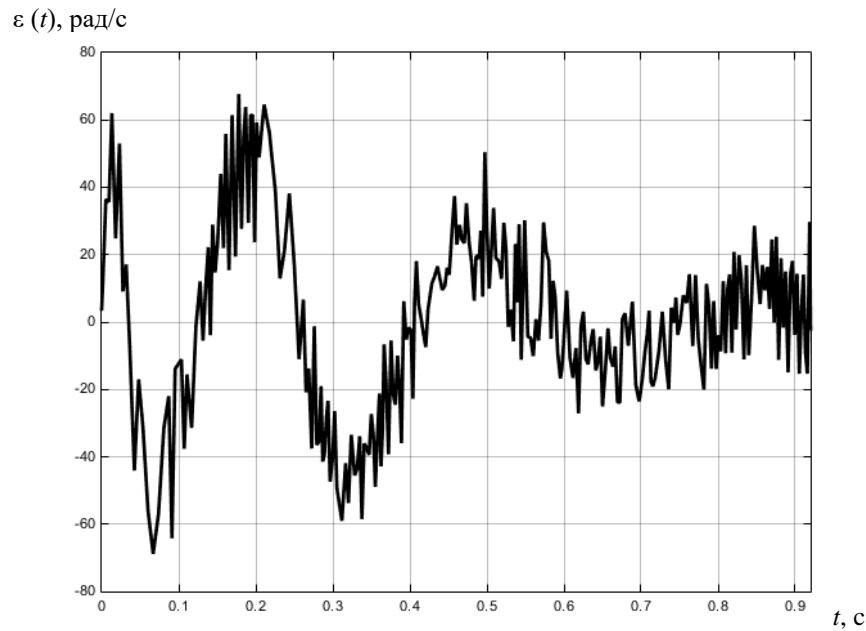


Рис. 4. График невязки $\varepsilon(t)$

Анализ графика показывает, что процесс характеризуется флуктуациями, что очевидно, поскольку подобными флуктуациями сопровождается зависимость, полученная экспериментально. Переходный процесс длится 0,92 с и усредненное установившееся значение приближается к оси абсцисс.

На рис. 5 показан график зависимости $Q_\varepsilon(t)$, который характеризует динамическую точность процесса аппроксимации.

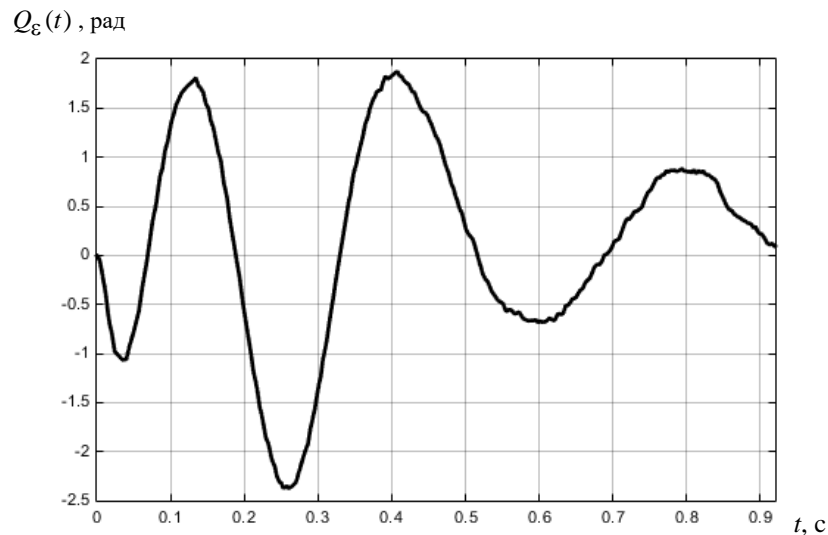


Рис. 5. График линейного интегрального критерия $Q_\varepsilon(t)$

Переходный процесс характеризуется максимальным отклонением 1,75 рад и постепенным затуханием до 0,09 рад ко времени окончания эксперимента, что подтверждает малую погрешность аппроксимации. В настоящей работе, в отличие от результатов, представленных в [19], знак $Q_\varepsilon(t)$ не имеет принципиального значения. В этой связи для оценки погрешности аппроксимации целесообразно использовать хорошо зарекомендовавший себя для решения практических задач критерий минимума интеграла от квадрата невязки $Q_\varepsilon^2(t)$, график которого показан на рис. 6.

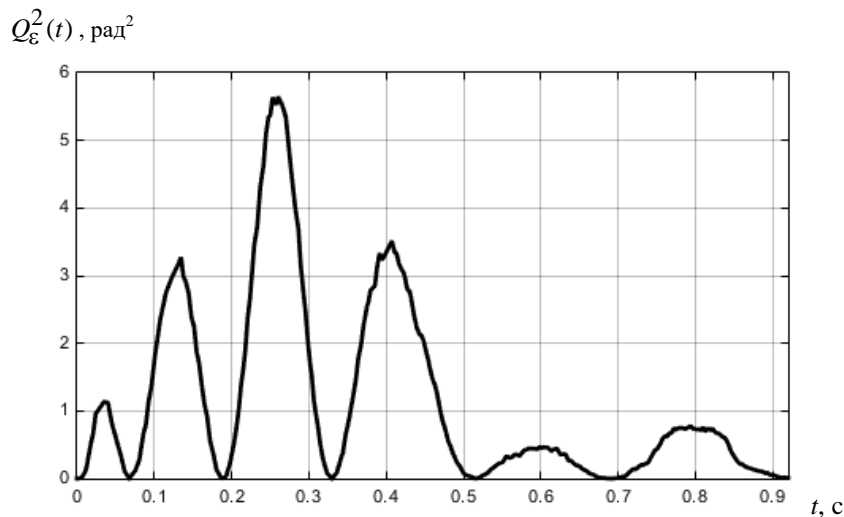


Рис. 6. График интеграла от квадрата невязки $Q_{\varepsilon}^2(t)$

Установившееся значение приведенного на рис. 5 критерия приближается к нулю и составляет $Q_{\varepsilon,уст}^2 = 0,008 \text{ рад}^2$, что подтверждает требуемую точность проведенной экспериментально-аналитической идентификации модели электромеханического преобразователя постоянного тока.

Выводы

Проведенные исследования дают возможность получения уравнений динамики по результатам эксперимента и показывают целесообразность предложенного подхода для анализа динамических свойств электромеханических преобразователей на этапе проектирования и контроля их функционирования в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

Литература

1. Коугия В.А. Избранные труды. Исследования по теории математической обработки результатов измерений: монография. СПб.: ПГУПС, 2012. 447 с.
2. Седова И.Ю., Юдина О.И. Исследование параметров математической модели для расчета добавочных потерь в двигателе постоянного тока при импульсном питании. Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технологический университет. 2007.
3. Abell J. MATLAB and SIMULINK. Modeling Dynamic Systems. Create Space Independent Publishing Platform, Seattle, 2016.
4. Колеснев А.С., Котин А.И., Матвеева Т.А., Зотова С.А. Сглаживание экспериментальных зависимостей по методу наименьших квадратов // Современные наукоемкие технологии. 2014. №5-2. С. 193.
5. Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Aarti Singh, and Yining Wang. Near-optimal design of experiments via regret minimization. In Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. Proceedings of Machine Learning Research. Sydney, Australia, August 2017. pp. 126–135
6. Oluic, M., Ghandhari, M., and Berggren, B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. IEEE Trans. Power Syst. 2016.V. 32. N. 2. pp. 1202–1211.
7. Кашаев Р.С., Свинин А.Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. №11-12. С.152-160.
8. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018.Т.20. №7-8. С.107-116.
9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Исследование и синтез модального регулятора двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т 20. №7-8. С.99-106.
10. Малёв Н .А., Погодицкий О .В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019.Т.21.№ 1-2. С.120–130.

11. Meurice, L. Nagy, C. Cleve, A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) CAiSE 2016. LNCS2016.V. 9694, pp. 491–506. Springer, Cham.
12. Кислицын А.Л. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах // Сборник научных трудов. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. 304 с.
13. Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. Экспериментальное исследование синхронного двигателя с постоянными магнитами // ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск № 7. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия-2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. 118 с.
14. Крупович В.И., Барыбин Ю.Г. Самовер М.Л. Проектирование электроснабжения. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 456 с.
15. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 480 с.
16. Ehsani B. Data Acquisition using LabVIEW. Packt Publishing, 2016. P. 166.
17. Бадьштова К.Д., Грабовый К.Д., Щербань И.В. Комплект виртуальных приборов National Instruments для схемотехнического моделирования аналоговых динамических объектов // Международный научный журнал «Символ науки» 2016;6:43–46.
18. Yang Y. LabVIEW Graphical Programming Cookbook. Packt Publishing, 2014. P. 252
19. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60–67.
20. M.A. Khanesar, Y. Oniz, O. Kaynak et al., "Direct model reference adaptive fuzzy control of networked SISO nonlinear systems"// IEEE/ASME Trans. Mechatronics. V.21. №1. pp. 205-213, 2016.
21. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models // IEEE Trans. Power Syst. 2016.V. 31. N. 2. pp. 942–948.
22. G. De La Torre, T. Yucelen, E.N. Johnson. A new model reference control architecture: stability performance and robustness, Int. J. Robust Nonlinear Control. 2016.V.26.№ 11. pp. 2355–2377.
23. B. Rashidi, M. Esmaeilpour, M.R. Homaeinezhad. Precise angular speed control of permanent magnet DC motors in presence of high modeling uncertainties via sliding mode observer-based model reference adaptive algorithm // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 2015.V. 1. N. 28. pp. 79–95.
24. H.H. Pan, W.C. Sun, H.J. Gao, "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application" // IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 2016. V. 13.N 2. pp. 868–875.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мухаметшин Азат Ильдусович – ассистент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Городнов Антон Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ).

References

1. Kougia VA. Selected Works. *Studies in the theory of mathematical processing of measurement results: a monograph*. SPb.: PGUPS, 2012. 447 p.
2. Sedova IYu., Yudina OI Study of the parameters of the mathematical model for calculating the additional losses in a DC motor with pulsed power .Sev.-Kavk. state tech. un-t. Stavropol, 2007.
3. Abell, J. *MATLAB and SIMULINK. Modeling Dynamic Systems*. Create Space Independent Publishing Platform, Seattle, 2016.
4. Kolesnev AS., Kotin AI., Matveeva TA., Zotova SA. Smoothing of experimental dependencies by the least squares method . *Modern high technologies*. 2014;5(2):193.
5. Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Aarti Singh, and Yining Wang. Near-optimal design of experiments via regret minimization. *In Proceedings of the 34th International Conference on Machine*

Learning, volume 70 of *Proceedings of Machine Learning Research*. 2017. Sydney, Australia, August. pp. 126–135.

6. Oluic, M., Ghandhari, M., and Berggren, B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016. pp. 1202–1211.

7. Kashaev PS., Svinin AY., Kozelkov OV. Minimization of experiment errors in the method of PMR and opportunities for receiving of relaxation times spectra. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(11-12):152-160.

8. Petrov TI., Safin AR., Ivshin IV., Tsvetkov AN., Kornilov VY. Model of the control system rocking machines of oil the basic of a synchronous engines with the sensorless method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(7-8):107-116.

9. Malev NA., Pogoditsky OV. Research and synthesis of the modal regulator of the two-mass electromechanical system of the crane lifting mechanism. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018; 20(7-8):99-106.

10. Malev NA., Pogoditsky OV. Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(1-2):120-130.

11. Meurice, L. Nagy, C. Cleve, A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) CAiSE 2016. LNCS.V. 9694. pp. 491–506. Springer, Cham (2016).

12. Kislitsyn AL. (Ed.) Questions of the theory and design of electrical machines. Parameters and characteristics of electric cars in static and dynamic modes. *Collection of scientific papers*. Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk: UIGTU, 2017. 304 p.

13. Shmarin YaA., Kodkin VL. Experimental study of synchronous motors with permanent magnets. - *BULLETIN of the CIGRE Russian National Committee Materials of the 7 th Youth Section of the RNC CIGRE: a collection of competitive reports "Energy-2015" in the field of electricity and electrical engineering in the areas of CIGRE research*. Ivanovo, 2015. 118 p.

14. Krupovich VI., Barybin YuG. Samover ML. *Handbook of power supply design*. 3rd ed. M.: Energy, 1980. 456 p.

15. Katzman MM. *Handbook of electric machines*. M.: Publishing Center "Academy", 2005. 480 p.

16. Ehsani B. *Data Acquisition using LabVIEW*. Packt Publishing, 2016. 166 p.

17. Badyshtova KD., Grabovy KD., Shcherban IV. Set of VI for simulation of analog dynamic objects implemented by means of National Instruments tools. *International Scientific Journal "Symbol of Science"* 2016; 6:43-46.

18. Yang Y. *LabVIEW Graphical Programming Cookbook*. Packt Publishing, 2014. 252 p.

19. Malev NA., Pogoditsky OV., Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019. №1. pp. 60–67.

20. Khanesar MA, Y. Oniz, O. Kaynak et al., "Direct model reference adaptive fuzzy control of networked SISO nonlinear systems". *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2016, pp. 205-213.

21. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016. pp. 942–948.

22. La Torre GDe, Yucelen T., Johnson EN., "A new model reference control architecture: stability performance and robustness". *Int. Journal Robust Nonlinear Control*, 2016; 26 (11):2355-2377.

23. Rashidi B., Esmailpour M., Homaeinezhad MR., "Precise angular speed control of permanent magnet DC motors in presence of high modeling uncertainties via sliding mode observer-based model reference adaptive algorithm". *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2015. pp. 79-95

24. Pan HH., Sun WC., Gao HJ., "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, pp. 868-875, 2016.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat I. Mukhametshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton G. Gorodnov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia.