

# Исследование работы адаптивного алгоритма идентификации электрических параметров асинхронного электродвигателя в условиях искажения измеряемых сигналов

М. В. Таланов, В. М. Таланов

Национальный исследовательский мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарёва  
г. Саранск, Республика Мордовия

mvtal@mail.ru

**Аннотация.** В работе предлагается алгоритм определения параметров асинхронного электродвигателя при наличии шумов в измеряемых сигналах. Рассматриваемый алгоритм основан на дифференциальных уравнениях, описывающих изменение проекций тока статора в режиме короткого замыкания электродвигателя. Разработанный алгоритм оценки параметров может быть использован для микропроцессорной реализации режима автоматического определения параметров электродвигателя для бездатчиковых систем управления электроприводом.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель; адаптивный фильтр; идентификация параметров; шум сигнала; бездатчиковая система управления электроприводом

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе предлагается алгоритм идентификации параметров асинхронного электродвигателя при искажении измеряемых сигналов и приводится анализ предложенного алгоритма. Разработка такого алгоритма идентификации актуальна для микропроцессорных систем управления электроприводом, где применяется ШИМ-модуляция сигналов [1, 2].

При наличии шума в измеряемом сигнале прибегают к частотной фильтрации, чтобы выделить полезную составляющую. Назначение частотного фильтра в том, чтобы обеспечить наибольшее значение коэффициента передачи  $K(j\omega)$  в области частот, на которую приходится основная доля энергии сигнала, и наименьшее значение  $K(j\omega)$  там, где велика спектральная плотность мощности шума.

Для описания относительного уровня сигнала используется такая характеристика как отношение сигнал/шум на входе и выходе фильтра:

$$Q_{\text{вх}} = \frac{\langle S_{\text{вх}}^2 \rangle}{\sigma_{\text{пвх}}^2} \quad (1)$$

$$Q_{\text{вых}} = \frac{\langle S_{\text{вых}}^2 \rangle}{\sigma_{\text{пвых}}^2}, \quad (2)$$

где  $\langle S_{\text{вх}}^2 \rangle$ ,  $\langle S_{\text{вых}}^2 \rangle$  – средний квадрат входного и выходного сигнала;  $\sigma_{\text{пвх}}^2$ ,  $\sigma_{\text{пвых}}^2$  – дисперсия входного и выходного шума.

Для фильтра с коэффициентом передачи  $K(j\omega)$  отношение сигнал/шум на выходе фильтра определяется как:

$$Q_{\text{вых}} = \frac{\langle S_{\text{вых}}^2 \rangle}{\sigma_{\text{пвых}}^2} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} A_k^2 |K(j\omega_k)|^2}{\int_0^{\infty} F_n(\omega) |K(j\omega)|^2 d\omega} \quad (3)$$

где  $F_n(\omega)$  – спектральная плотность мощности входного шума;  $A_k$  – амплитуды в спектре входного сигнала.

Уравнение (3) позволяет, зная спектры входного сигнала и шума, так подобрать АЧХ фильтра, чтобы получить существенное увеличение относительной доли полезного сигнала.

Величина  $Q_{\text{вых}} / Q_{\text{вх}}$  называется выигрышем фильтра по отношению сигнал/шум:

$$M_{\phi} = \frac{Q_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}}} \quad (4)$$

Если  $M_{\phi} > 1$ , то фильтрация суммы сигнала и шума приводит к повышению относительного уровня полезного сигнала на выходе фильтра.

## II. УРАВНЕНИЯ ИДЕНТИФИКАТОРА

В работе [3] предложены дифференциальные уравнения описывающие изменение токов статора асинхронного электродвигателя в режиме короткого замыкания, основанные на математической модели обобщенной электрической машины в неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta)$ .

Для определения параметров асинхронного электродвигателя в условиях искажения измеряемых сигналов необходимо оценить коэффициенты

передаточной функции, записанной по дифференциальному уравнению из [3, 4]:

$$W_0(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_1 p + b_2}{p^2 + a_1 p + a_2} \quad (5)$$

Для этого составим уравнения адаптивного идентификатора, который определяет коэффициенты числителя  $b_1, b_2$  при заданных коэффициентах знаменателя  $a_1, a_2$  передаточной функции  $W_0(p)$ .

Запишем передаточную функцию ФНЧ Баттерворта 2-го порядка с заданной частотой среза  $\omega_{cp}$ :

$$W_\phi(p) = \frac{\alpha_2}{p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2} \quad (6)$$

Коэффициент передачи такого фильтра будет равен:

$$|K(j\omega)|^2 = \frac{\alpha_2^2}{(\alpha_1 \omega)^2 + (\alpha_2 - \omega^2)^2} \quad (7)$$

Зададим операторный полином, соответствующий знаменателю передаточной функции (6):

$$A_0(p) = p^n + \alpha_1 p^{(n-1)} + \dots + \alpha_{(n)}, \quad (8)$$

где  $n = 2$ .

Составим математическую модель идентификатора, используя передаточную функцию  $W_0(p)$ :

$$A(p)y(p) = B(p)u(p) \quad (9)$$

где  $y(p)$  – образ выходного сигнала тока короткого замыкания;  $u(p)$  – образ входного сигнала напряжения короткого замыкания.

Умножим левую и правую часть уравнения (9) на  $W_\phi(p)$  и выразим  $y(p)$ :

$$\frac{[A_0(p) - A_0(p) + A(p)]}{A_0(p)} y(p) = \frac{B(p)}{A_0(p)} u(p) \quad (10)$$

$$y(p) = \frac{A_0(p) - A(p)}{A_0(p)} y(p) + \frac{B(p)}{A_0(p)} u(p) \quad (11)$$

Введем новые переменные:

$$\tilde{y}_i(p) = \frac{p^{i-1}}{A_0(p)} y(p) \quad (12)$$

$$\tilde{u}_i(p) = \frac{p^{i-1}}{A_0(p)} u(p), \quad (13)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Запишем уравнения фильтров входных сигналов относительно новых переменных:

$$\tilde{y}(t) = A\tilde{y}(t) + B\tilde{u}(t) \quad (14)$$

$$\tilde{u}(t) = A\tilde{u}(t) + B\tilde{u}(t), \quad (15)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{(n-1)} & -\alpha_{(n-2)} & \dots & -\alpha_{(1)} \end{bmatrix}, n \times n$$

$$B = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T, n \times 1$$

Обозначим матрицу сигналов как:

$$W(t) = [\tilde{y}_n(t) \dots \tilde{y}_1(t) \tilde{u}_n(t) \dots \tilde{u}_1(t)] \quad (16)$$

Оценка выходного сигнала тока короткого замыкания будет выражаться как:

$$\hat{y}(t) = W(t)\hat{a}(t), \quad (17)$$

где  $\hat{a}(t) = [(\alpha_1 - a_1) \ (\alpha_2 - a_2) \ \hat{b}_1 \ \hat{b}_2]^T$  – оценка неизвестных параметров в передаточной функции (5).

Прогнозируемая ошибка выражается как:

$$e(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (18)$$

Итак, оценка коэффициентов числителя передаточной функции  $W_0(p)$  находится из решения следующего дифференциального уравнения:

$$\dot{\hat{a}}(t) = -\gamma W^T(t)e(t), \quad (19)$$

где  $\gamma$  – заданный положительный коэффициент.

Адаптивный идентификатор позволяет получить не только оценку коэффициентов числителя  $b_1, b_2$ , но и оценку тока короткого замыкания  $\hat{I}_{кз\alpha}(t)$ . Графики оценок коэффициентов числителя  $b_1, b_2$  должны представлять собой монотонно возрастающие функции к некоторому постоянному значению.

Запишем нормированный коэффициент взаимной корреляции двух сигналов  $x_1(n) = \hat{I}_{кз\alpha}(n)$ ,  $x_2(n) = I_{кз\alpha}(n)$ , чтобы определить качество оценки  $\hat{I}_{кз\alpha}(n)$  при корректной оценке коэффициентов передаточной функции  $W_0(p)$ :

$$\rho_{12}(j) = \frac{r_{12}(j)}{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n)}}, j = 0, \dots, N \quad (20)$$

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} F_D^{-1} [X_1^*(n) X_2(n)], \quad (21)$$

где  $N$  – размер выборки;  $F_D^{-1}$  – обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ);  $X_1(n)$  – ДПФ-образ

$x_1(n)$ ;  $X_2(n)$  – ДПФ-образ  $x_2(n)$ ;  $j$  – заданная задержка; знак «\*» обозначает комплексно-сопряженные значения.

Коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{xy}(j)$  показывает степень совпадения двух сигналов, где  $j$  – задержка второго сигнала, т.е. число точек выборки, на которое второй сигнал смещается влево. Коэффициент  $\rho_{xy}(j)$  может принимать значения в диапазоне от  $-1$  до  $+1$ , причем « $+1$ » означает, что два сигнала полностью совпадают, « $-1$ » – два сигнала находятся в противофазе. Значение « $0$ » означает, что один из сигналов абсолютно случаен. При практических расчетах коэффициент корреляции необходимо находить для различных задержек, чтобы установить наибольшее значение, которое затем считается истинным.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 показаны проекции измеряемых сигналов в режиме короткого замыкания для неподвижной системы координат  $(\alpha, \beta)$ .

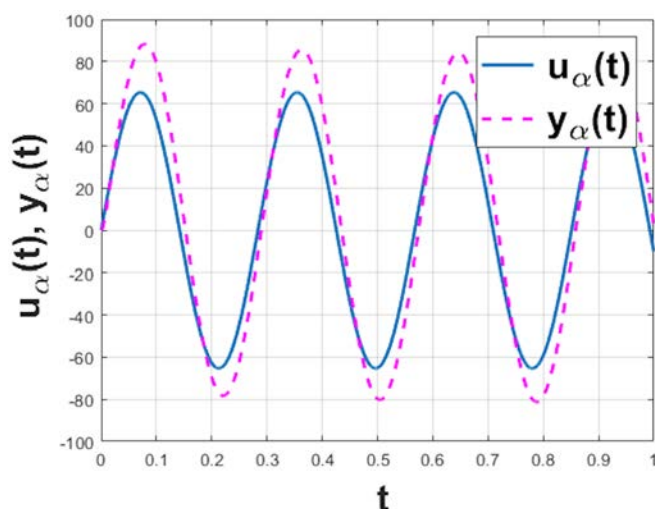


Рис. 1. Проекция сигналов напряжения и тока короткого замыкания

На рис. 2 показаны проекции измеряемых сигналов в режиме короткого замыкания для неподвижной системы координат  $(\alpha, \beta)$  при наличии шума.

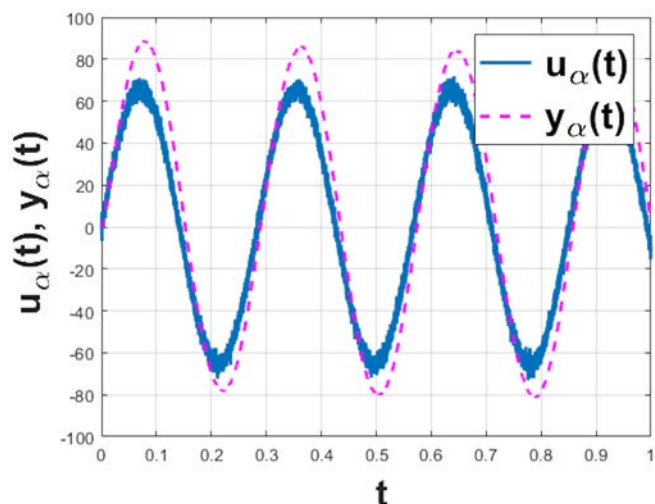


Рис. 2. Проекция сигналов напряжения и тока короткого замыкания при наличии шума

На рис. 3 показаны проекции измеряемых сигналов в режиме короткого замыкания для неподвижной системы координат  $(\alpha, \beta)$  при ШИМ-модуляции входного напряжения.

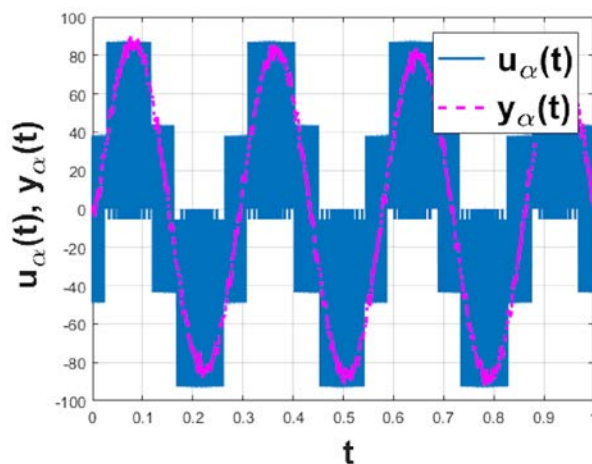


Рис. 3. Проекция сигналов напряжения и тока короткого замыкания при ШИМ-модуляции

В табл. 1 представлена оценка параметров электродвигателя в случае использования измеренных сигналов идеальной формы, показанных на рис. 1. Теоретические параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 были рассчитаны по паспортным данным по методике из [5].

ТАБЛИЦА 1. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ RA132MB2 В СЛУЧАЕ СИГНАЛОВ БЕЗ ШУМА

| Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 | Теор. парам. | Оценка парам. | Отн. ошиб. $\delta$ , % |
|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Мощность, кВт                                       | 11           |               |                         |
| Номинальная скорость вращения, об/мин               | 2905         |               |                         |
| Сопrotивление обмотки статора, Ом                   | 0.4291       | 0.4291        | 0.0                     |
| Сопrotивление обмотки ротора, Ом                    | 0.3751       | 0.390         | -3.8                    |
| Индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн         | 0.0018       | 0.002         | -1.8                    |
| Индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн          | 0.0018       | 0.002         | -1.8                    |
| Индуктивность намагничивания, Гн                    | 0.0924       | 0.094         | -2.1                    |
| Инерция, кгм <sup>2</sup>                           | 0.0195       |               |                         |
| Коэффициент вязкого трения                          | 0.0025       |               |                         |
| Количество пар полюсов                              | 1            |               |                         |

В табл. 2 представлена оценка параметров электродвигателя при наличии шума в измеряемых сигналах, показанных на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ RA132MB2 ПРИ НАЛИЧИИ ШУМА

| Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 | Теор. парам. | Оценка парам. | Отн. ошиб. $\delta$ , % |
|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Мощность, кВт                                       | 11           |               |                         |
| Номинальная скорость вращения, об/мин               | 2905         |               |                         |
| Сопrotивление обмотки статора, Ом                   | 0.4291       | 0.4291        | 0.0                     |
| Сопrotивление обмотки ротора, Ом                    | 0.3751       | 0.387         | -3.2                    |
| Индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн         | 0.0018       | 0.002         | -1.5                    |

| Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 | Теор. парам. | Оценка парам. | Отн. ошиб. $\delta$ , % |
|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн          | 0.0018       | 0.002         | -1.5                    |
| Индуктивность намагничивания, Гн                    | 0.0924       | 0.094         | -1.7                    |
| Инерция, кгм <sup>2</sup>                           | 0,0195       |               |                         |
| Коэффициент вязкого трения                          | 0.0025       |               |                         |
| Количество пар полюсов                              | 1            |               |                         |

В табл. 3 представлена оценка параметров электродвигателя в случае ШИМ-модуляции измеряемых сигналов, показанных на рис. 3.

ТАБЛИЦА II. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ RA132MB2 В СЛУЧАЕ ШИМ-МОДУЛЯЦИИ

| Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 | Теор. парам. | Оценка парам. | Отн. ошиб. $\delta$ , % |
|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Мощность, кВт                                       | 11           |               |                         |
| Номинальная скорость вращения, об/мин               | 2905         |               |                         |
| Соппротивление обмотки статора, Ом                  | 0.4291       | 0.426         | 0.8                     |
| Соппротивление обмотки ротора, Ом                   | 0.3751       | 0.386         | -2.9                    |
| Индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн         | 0.0018       | 0.002         | -0.9                    |
| Индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн          | 0.0018       | 0.002         | -0.9                    |
| Индуктивность намагничивания, Гн                    | 0.0924       | 0.093         | -1.2                    |
| Инерция, кгм <sup>2</sup>                           | 0,0195       |               |                         |
| Коэффициент вязкого трения                          | 0.0025       |               |                         |
| Количество пар полюсов                              | 1            |               |                         |

Результаты моделирования показывают, что с помощью предложенного алгоритма адаптивной фильтрации можно получить оценку параметров электродвигателя с погрешностью в пределах 5%.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм идентификации параметров асинхронного электродвигателя при искажении измеряемых сигналов. Представлены результаты анализа работы идентификатора при наличии и отсутствии шума в измеряемых сигналах. Результаты анализа показывают, что алгоритм идентификации на основе предложенной регрессионной модели [3] дает удовлетворительную оценку при ШИМ-модуляции входных напряжений электродвигателя. Оценка электрических параметров электродвигателя по предложенному алгоритму может использоваться для построения наблюдателя скорости в составе бездатчиковой системы управления электроприводом [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Talanov M.V., Karasev A.V., Talanov V.M. Implementation of extended Kalman filtering algorithm with improved flux estimator on TMS320F28335 processor for induction sensorless drive // Proceedings of the 6th European Embedded Design in Education and Research Conference 11-12 September 2014. Milan, Italy. IEEE. C. 119-123. doi:http://dx.doi.org/10.1109/EDERC.2014.6924371
- [2] Talanov M.V., Talanov V.M. Software and hardware solution for digital signal processing algorithms testing // E3S Web Conf., Volume 124, 2019, International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), Article number 03006. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912403006
- [3] Таланов М.В. Таланов В.М. Регрессионная модель для идентификации электрических параметров асинхронного электродвигателя в бездатчиковых системах управления электроприводом. // Научно-технический вестник Поволжья, 2022, №4. С. 30-33
- [4] Talanov M.V., Talanov V.M. Induction Motor Electrical Parameters Identification Algorithm Based on Adaptive IIR Filter // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS) (Saint Petersburg, 21-23 September 2023). Saint Petersburg, 2023. pp. 103-105, doi: 10.1109/CTS59431.2023.10288770
- [5] Терехин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink: учеб. пособие для СПО. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 306 с.
- [6] Таланов М.В. Таланов В.М. Бездатчиковая система векторного управления асинхронным электродвигателем на основе сигматочечного фильтра Калмана. // Научно-технический вестник Поволжья, 2021, №8. С. 39-44