

УДК 621.313.333

Применение дифференциальных уравнений в адаптивной системе управления асинхронным двигателем с нейросетевой настройкой БИХ-фильтра

Аверьянов М.В., Таланов М.В.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

Аннотация: Трёхфазные асинхронные электроприводы широко применяются в промышленности и требуют сложной системы регулирования скорости и момента. Асинхронный электродвигатель описывается дифференциальными уравнениями электрического равновесия обмоток. Эти уравнения принято называть уравнениями обобщенной электрической машины. Классические регуляторы (например, ПИ-регуляторы с фиксированными коэффициентами) могут не обеспечивать требуемую точность при изменении параметров двигателя (таких как сопротивление обмоток или постоянная времени ротора) во время работы. Адаптивные алгоритмы управления с использованием нейросетей, автоматически перенастраивают параметры регуляторов, в нашем случае БИХ-фильтр, для компенсации таких изменений.

Ключевые слова: электропривод, алгоритм управления, БИХ-фильтр, математическая модель

1. Математическая модель двигателя

Уравнения векторной системы управления строятся на базе координатных преобразований Парка-Горева. Для этого необходимо записать уравнения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором относительно тока статора и потокосцепления ротора в синхронной ортогональной системе координат (d, q) , ориентированной по вектору потокосцепления ротора [1]:

$$\sigma L_s \frac{dI_d}{dt} = -R_s I_d + U_d + \sigma L_s \omega_\psi I_q - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt}, \quad (1)$$

$$\sigma L_s \frac{dI_q}{dt} = -R_s I_q + U_q - \sigma L_s \omega_\psi I_d - \frac{L_m}{L_r} \omega_\psi \Psi_r, \quad (2)$$

$$T_r \frac{d\Psi_r}{dt} = -\Psi_r + L_m I_d, \quad (3)$$

$$\omega_\psi = \omega + \omega_s = \omega + \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{I_q}{\Psi_r}, \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_q, \quad (5)$$

где R_s, R_r – активные сопротивления фаз статора и ротора; L_s, L_r, L_m – индуктивности фаз статора, ротора и взаимная индуктивность; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коэффициент рассеяния; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени роторной цепи; U_d, U_q, I_d, I_q – проекции векторов напряжения и тока статора на оси d и q ; ω_ψ – частота вращения вектора

потокосцепления ротора; $\omega = Z_p \omega_r$ – электрическая частота вращения ротора; ω_s – частота скольжения; Z_p – число пар полюсов; Ψ_r – потокосцепление ротора.

При этом система дифференциальных уравнений асинхронного электродвигателя, записанная по току статора и потокосцеплению ротора в неподвижной системе координат (α, β) , имеет вид [2]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_s} & 0 & \frac{L_m}{L_{\sigma s} L_r T_r} & \frac{\omega_r L_m}{L_{\sigma s} L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_s} & -\frac{\omega_r L_m}{L_{\sigma s} L_r} & \frac{L_m}{L_{\sigma s} L_r T_r} & 0 \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\sigma s}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{\sigma s}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Обозначения, используемые в системе уравнений:

- $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – проекции фазных напряжений обмоток статора в неподвижной системе координат (α, β) ;
- $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – проекции токов в обмотках статора в неподвижной системе координат (α, β) ;
- $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – проекции потокосцепления ротора в неподвижной системе координат (α, β) ;
- ω_r – угловая скорость вращения ротора;
- $L_{\sigma s} = \sigma L_s$ – переходная индуктивность статора;
- L_s, L_r, L_m – индуктивности обмоток статора, ротора и намагничивания (взаимная индуктивность);
- $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени роторной цепи.

Эти системы дифференциальных уравнений являются базой разработки алгоритма управления, поскольку на их основе рассчитываются управляющие воздействия для обеспечения требуемой динамики двигателя.

В векторном управлении система управления стремится отдельно регулировать поток и момент двигателя, управляя составляющими тока I_d и I_q . В адаптивной схеме используется эталонная модель желаемого поведения, а закон управления корректируется по ошибке между фактическими и заданными величинами. При этом выполняется процедура автонастройки: нейросетевой алгоритм периодически уточняет оценку параметров двигателя и пересчитывает весовые коэффициенты, обеспечивая стабильную работу при изменении условий (нагрузки, параметров модели) [3].

В цифровой системе управления измеренные сигналы (скорость, токи) часто пропускаются через цифровые фильтры. БИХ-фильтр (с бесконечным импульсным откликом) описывается рекурсивными уравнениями и при том же числе коэффициентов даёт более «крутой» частотный отклик, чем КИХ-фильтр [4]. В адаптивном управлении фильтр может сглаживать шумы или предварительно формировать сигнал управления. Выходной сигнал фильтра сравнивается с эталонным, а нейронная сеть получает разность (ошибку) на вход и обновляет коэффициенты БИХ-фильтра (например, по правилу градиентного спуска или по методу наименьших квадратов) для уменьшения ошибки в дальнейших итерациях.

Идея реализации алгоритма управления заключается в следующем. По измеренным напряжениям и токам на основе дифференциальных уравнений рассчитываются

текущие потокосцепления ротора и момент двигателя. Далее по заданной опорной скорости или моменту и оценённым потокам оценивается необходимая величина тока по осям d и q . По этим величинам тока вычисляются опорные напряжения статора с учётом компенсации перекрёстных связей. Измеренные сигналы (ток, скорость) проходят через адаптивный БИХ-фильтр для подавления шумов и выделения динамической составляющей. Разность между требуемым и фактическим значением (ошибка) поступает на вход нейронной сети. Сеть корректирует свои веса, изменяя коэффициенты фильтра, чтобы снизить ошибку в следующих итерациях.

2. Заключение

Модель двигателя на основе дифференциальных уравнений обеспечивает точное описание динамики электропривода. Использование БИХ-фильтра в контуре управления улучшает качество сигналов и устойчивость к помехам. Нейросетевая настройка фильтра добавляет адаптивность: сеть «учится» компенсировать погрешности модели и возмущения в реальном времени, обеспечивая более быстрый выход в установившийся режим и меньшую статическую ошибку по сравнению с системами с фиксированными регуляторами [5].

Литература

1. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
2. 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. Казань: ООО «Рашин Сайнс».
3. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7. С. 7-17.
4. Ahmed A. H. O., Ajangnay M. O., Mohamed S. A., Dunnigan M. W. A New Technique for Position Control of Induction Motor Using Adaptive Inverse Control // Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ01). Basrah, Iraq: Heriot-Watt University Press, 2010. P. 116-122.
5. Kady Benyekhlef, Mourad Hebali, Ibrahim Farouk Bouguenna, Benaoumeur Ibari, Menouer Benaoum. High-Performance Inverse Artificial Neural Network Controller for Asynchronous Motor Control // Journal of Engineering and Exact Sciences. 2024. Vol. 10, No. 9. eISSN 2527-1075; ISSN 2446-9416. [Электронный ресурс].

MSC 93C85

Application of differential equations in an adaptive control system for an asynchronous motor with neural network tuning of a BICH filter

M.V. Averianov, M.V. Talanov

National Research Mordovia State University

Abstract: Three-phase asynchronous electric drives are widely used in industry and require a complex speed and torque control system. An asynchronous electric motor is described by differential equations of electrical equilibrium of windings. These equations are commonly referred to as generalised electric machine equations. Classic controllers (e.g., PI controllers with fixed coefficients) may not provide the required accuracy when motor parameters (such as winding resistance or rotor time constant) change during operation. Adaptive control algorithms using neural networks automatically reconfigure the parameters of the controllers, in our case the BICH filter, to compensate for such changes.

Keywords: electric drive, control algorithm, IIR-filter, mathematical model

References

1. Kovach K. P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow: Gosenergoizdat, 1963. 744 p. (in Russian)
2. Talanov M. V., Talanov V. M. *Regressionnaya model' dlya identifikatsii elektricheskikh parametrov asinkhronnogo elektrodvigatelya v bezdatchikovykh sistemakh upravleniya elektroprivodom* [Regression model for identification of electrical parameters of induction motor in sensorless electric drive control systems] // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. 2022. No. 4. P. 30-33. Kazan: "Rashin Science" LLC. (in Russian)
3. Vinogradov A. B., Chistoserdov V. L., Sibirtsev A. N. *Adaptivnaya sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom* [Adaptive vector control system for induction motor drive] // *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2003. No. 7. P. 7-17. (in Russian)
4. Ahmed A. H. O., Ajangnay M. O., Mohamed S. A., Dunnigan M. W. *A New Technique for Position Control of Induction Motor Using Adaptive Inverse Control* // *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ01)*. Basrah, Iraq: Heriot-Watt University Press, 2010. P. 116-122.
5. Kady Benyekhlef, Mourad Hebali, Ibrahim Farouk Bouguenna, Benaoumeur Ibari, Menouer Bennaoum. *High-Performance Inverse Artificial Neural Network Controller for Asynchronous Motor Control* // *Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2024. Vol. 10, No. 9. eISSN 2527-1075; ISSN 2446-9416. [Online resource].