

БЕЗДАТЧИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

SENSORLESS METHODS FOR DETERMINING THE MECHANICAL PARAMETERS OF A HYBRID STEPPER MOTOR

A. Ulyashev
A. Startsev
A. Kudelin

Summary. In this paper, a scientific review of the literature on the subject of sensorless determination of the mechanical parameters of a stepper motor is made. The methods presented in these works can be divided into two groups according to the method of determining the mechanical parameters: by measuring the back-EMF and by using the Kalman filter. The methods were analyzed, their advantages and disadvantages were determined, and the possibility of detecting the phenomenon of skipping steps was revealed. The literature review showed that there is no universal method capable of determining all the mechanical parameters of a stepper motor, including when the motor is running with accelerations.

Keywords: stepper motor, mathematical model, Kalman filter, sensorless control.

Уляшев Артём Евгеньевич

Аспирант, Ухтинский государственный
технический университет
artem.ulyashev@gmail.com

Старцев Андрей Эврикович

К. т. н., доцент, Ухтинский государственный
технический университет
astarcev@ugtu.net

Куделин Артём Георгиевич

К. т. н., доцент, Ухтинский государственный
технический университет
akudelin@ugtu.net

Аннотация. В данной работе произведен научный обзор литературных источников, посвященных тематике бездатчикового определения механических параметров шагового двигателя. Методы, представленные в этих работах, можно разделить на две группы по способу определения механических параметров: по измерению противо-ЭДС и применения фильтра Кальмана. В работе используется такой научный метод, как литературный обзор. Произведен анализ бездатчиковых методов, определены их преимущества и недостатки, а также выявлена возможность детектирования явления пропуска шагов. Литературный обзор показал, что отсутствует универсальный метод, способный определять все механические параметры шагового двигателя, в том числе при работе двигателя с ускорениями.

Ключевые слова: шаговый двигатель, математическая модель, фильтр Кальмана, бездатчиковое управление.

Введение

Управление гибридными шаговыми двигателями в системах без обратной связи по положению вала имеет низкие динамические показатели, низкое отношение момента к мощности двигателя, пульсации момента сопротивления и резонанс [1]. При этом шаговые двигатели применяются в задачах позиционирования, которые требуют высоких динамических показателей. Использование шаговых двигателей в более требовательных приложениях осуществляется за счет управления с обратной связью [2]. Обратная связь по положению возможна за счет механических угловых датчиков — энкодеров, которые увеличивают стоимость и размеры системы позиционирования. Работоспособность и точность датчиков зависят от внешних условий окружающей среды (температура, влажность и давление), а также датчики требуют точной юстировки с валом шагового двигателя [1].

Исключение энкодеров из системы позиционирования осуществляется за счет использования методов бездатчикового определения механических параметров

двигателя. К механическим параметра шагового двигателя относятся угловая скорость вращения вала и его угловое положение, а также крутящий момент двигателя и момент сопротивления на его валу. Бездатчиковые методы основаны на косвенном вычислении механических параметров по электрическим (сила тока, напряжение, противо-ЭДС, изменение индуктивности обмоток).

Литературный поиск был выполнен по работам, опубликованным с 90-х годов 20 века. Выполнен литературный поиск в отечественных изданиях и сервисах, таких как: eLibrary (URL: <https://elibrary.ru>), «Российская государственная библиотека» (URL: <https://www.rsl.ru>) и Scholar (URL: <http://www.scholar.ru>). В отечественных научных базах не было найдено работ по тематике бездатчикового определения механических параметров шагового двигателя. Выполнен литературный поиск в иностранных базах научной периодики, таких как: IEEE (URL: <https://www.ieee.org>), Science Direct (URL: <https://www.sciencedirect.com>), Research Gate (URL: <https://www.researchgate.net>) и Science Research (URL: <https://www.scienceresearch.com>). В результате поиска было найдено 5 работ, посвященных тематике данного литературного обзора.

Наиболее известные методы основаны на определении положения с помощью измерения значений противо-ЭДС в обмотках статора [3]. Главным недостатком этих методов является зависимость противо-ЭДС от скорости вращения вала. Так, на низких скоростях вращения, амплитудное значение противо-ЭДС не может быть точно измерено. Еще одним недостатком является невозможность прямого измерения данной величины, так как в обмотках двигателя дополнительно присутствует управляющее напряжение.

С развитием цифровых технологий и увеличением вычислительной мощности микроконтроллеров наиболее актуальным становится метод определения механических параметров двигателя на основе фильтра Кальмана [4, 5, 6]. Наиболее сложным в использовании фильтра Кальмана является выбор ковариационной матрицы, так как в литературе неизвестны правила выбора данной матрицы. Главными недостатками фильтра Кальмана являются большие вычислительные затраты и работа только с линейными моделями. В результате этого уравнения математической модели шагового двигателя подвергаются предварительной линеаризации.

Бездатчиковые методы определения механических параметров шагового двигателя

Значительную часть бездатчиковых методов можно разделить на две группы по способу определения механических параметров: по измерению значений противо-ЭДС, возникающей в обмотках двигателя при вращении вала, и по измерению силы тока.

Преимуществом первой группы методов является непосредственное выражение угловой скорости и положения из значений противо-ЭДС, которая определяется из математической модели двухфазного гибридного шагового двигателя [2] следующим образом:

$$\varepsilon_a = -K_m \cdot \omega \cdot \sin(p \cdot \theta),$$

$$\varepsilon_b = K_m \cdot \omega \cdot \cos(p \cdot \theta),$$

где ε_a — противо-ЭДС фазы А, ε_b — противо-ЭДС фазы В, K_m — постоянная двигателя, ω — угловая скорость вращения вала, p — число пар полюсов ротора и θ — угловое положение вала двигателя.

Угловое положение θ из значений противо-ЭДС определяется следующим образом:

$$\theta = \frac{1}{p} \cdot \arctan\left(\frac{-\varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right).$$

В работе [3] применяется данный метод определения углового положения вала с низкочастотной фильтрацией напряжения в обмотках для выделения из всего

спектра значений противо-ЭДС. В данной работе получена формула определения углового положения вала, которая дополнительно учитывает сдвиг фазы углового положения из-за применения НЧ фильтра:

$$\theta = \arctan\left(\frac{-V_{filta}}{V_{filtb}}\right) + \arctan\left(\frac{p \cdot \omega_d \cdot L}{R}\right).$$

Недостатками данного метода являются зависимость амплитуды противо-ЭДС от угловой скорости вращения вала, возможность использования метода только при постоянных скоростях вращения вала и отсутствие учета возможного изменения значений индуктивности L и сопротивления R обмоток статора из-за нагрева двигателя. Так же в работе не было проведено экспериментов по определению явления пропуска шагов, которое является существенным при использовании шагового двигателя без угловых датчиков. При этом данный метод рассчитан на работу только с постоянной скоростью вращения вала, которая не требует использования датчиков обратной связи.

Вторая группа методов определения механических параметров шагового двигателя базируется на измерении силы тока в обмотках статора. В работах [4, 5, 6] на основе измеренных значений силы тока производится определение скорости и углового положения с помощью алгоритма фильтра Кальмана.

Математическая модель гибридного шагового двигателя представляет из себя систему 4-х нелинейных дифференциальных уравнений [2], которая включает в себя 4 неизвестных параметра: сила тока фазы А, сила тока фазы В, угловая скорость и угловое положение. 4 неизвестных параметра формируют вектор состояния системы $x = [i_a, i_b, \omega, \theta]^T$.

Система дифференциальных уравнений для исключения нелинейных членов подвергается преобразованию Парка, которое предназначено для изменения системы координат токов из неподвижной во вращающуюся систему, которая ориентированна по вектору потокоцепления ротора. Токи статора преобразуются к системе постоянного тока следующим образом:

$$i_d = i_a \cdot \cos(p \cdot \theta) + i_b \cdot \sin(p \cdot \theta),$$

$$i_q = -i_a \cdot \sin(p \cdot \theta) + i_b \cdot \cos(p \cdot \theta),$$

где i_d — прямое значение силы тока и i_q — квадратурное значение силы тока.

После линеаризации системы уравнений применяют алгоритм фильтра Кальмана. Алгоритм фильтра Кальмана работает итеративно: на каждом шаге используются данные с датчиков тока (с шумом измерения), значение

вектора состояния системы на предыдущем шаге и по этим данным оценивается состояние системы на текущем шаге итерации. Так же алгоритм способен рассчитывать на каждом шаге разброс значений каждой переменной вектора состояния [4, 5, 6].

Дискретная линейная система состояния шагового двигателя выглядит следующим образом:

$$x_{k+1}^- = F \cdot x_k + B \cdot U_k,$$

$$y_k = H \cdot x_k + v_k,$$

где x_{k+1}^- — предсказание состояния системы в текущий момент времени, F — матрица динамической модели системы, x_k — вектор состояния системы в предыдущий момент времени, B — матрица управляющих воздействий, U_k — вектор управляющих напряжений, y_k — вектор измерений (содержит значения силы тока в обмотках статора), $H \cdot x_k$ — модель, которая связывает вектор состояния и измеряемые параметры и v_k — шум измерений (предполагается, что он имеет нормальное распределение).

После фазы предсказаний происходит корректировка вектора состояния. Рассчитывается матрица усиления Кальмана:

$$K_k = P_{k+1}^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{k+1}^- \cdot H^T + v_k)^{-1},$$

где K_k — матрица усиления Кальмана, P_{k+1}^- — предсказание ошибки ковариации. Затем происходит обновление оценки вектора состояний с учетом измеренных значений силы тока:

$$x_{k+1} = x_{k+1}^- + K_k \cdot (y_k - H \cdot x_{k+1}^-).$$

Конечным действием является обновление ошибки ковариации:

$$P_{k+1} = P_{k+1}^- - K_k \cdot H \cdot P_{k+1}^-.$$

В работах [4, 5, 6] применяется данный алгоритм для вычисления механических параметров шагового двигателя. Его преимуществом является возможность определения скорости и углового положения по измеренным значениям силы тока, работа при ускорениях вала и возможность определения крутящего момента двигателя.

В работах [4, 5] элементы матрицы усиления Кальмана рассчитываются заранее и далее считаются постоянными. Это сокращает вычислительные затраты, но при этом не учитывает возможное изменение индуктивности L и сопротивления обмоток статора R , от которых зависят значения элементов матрицы усиления Кальмана K_k .

В работе [4] максимальная ошибка в определении углового положения с помощью фильтра Кальмана составила 10 градусов. В работе [5] максимальная ошибка углового положения составила 11,5 градусов. Большая погрешность является самым главным недостатком методов, основанных на алгоритме фильтра Кальмана.

В работе [5] дополнительно с определением угловой скорости и углового положения определяют внешний момент сопротивления на валу. Экспериментальная проверка определения момента сопротивления в работе отсутствует, предоставлены только результаты математического моделирования.

В работе [6] матрица усиления Кальмана рассчитывается каждую итерацию. Так же в работе проведены исследования влияния изменений в величинах индуктивности L и сопротивления обмоток статора R на точность разработанного метода. В ходе данного исследования значения сопротивления и индуктивности изменялись на $\pm 10\%$ от номинального. Наиболее сильное влияние на точность оказывает изменение сопротивления обмоток статора R . Экспериментальная проверка метода в данной работе отсутствует, предоставлены только результаты математического моделирования. Данный метод имеет большую погрешность в определении углового положения в 10 градусов.

Отдельно следует выделить работу [7], в которой используются значения как противо-ЭДС, так и силы тока в обмотках статора для определения крутящего момента и момента сопротивления на валу двигателя. Полученный в данной работе метод не позволяет определять угловое положение и скорость. Главным недостатком данного метода является использование в алгоритме значений противо-ЭДС, которая, как в случае с методом [3], имеет скоростную зависимость.

Сравнение бездатчиковых методов

Выполним сравнение рассмотренных методов по следующим критериям: возможность определения углового положения и скорости, возможность определения крутящего момента и момента сопротивления на валу, проверка работоспособности метода при ускорениях вала, проверка метода при явлении пропуска шагов и экспериментальная проверка метода. Поместим результаты сравнения в таблице. Знаком «+» обозначим критерии, которые исследованы в соответствующей работе. Знаком «-» обозначим те критерии, которые точно не способен удовлетворить соответствующий метод, а буквами «н/д» обозначим критерии, о которых в работе нет информации.

Сравнение методов бездатчикового управления

| Название статьи | Определение положения и скорости | Определение крутящего момента | Работа метода при ускорениях вала | Проверка метода при пропуске шагов | Экспериментальная проверка метода |
|---|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| «Steady state Kalman filtering for sensorless control of hybrid stepper motors» | + | н/д | н/д | — | — |
| «Sensorless control of hybrid stepper motor» | + | + | + | — | + |
| «Sensorless load angle control for two-phase hybrid stepper motors» | — | + | н/д | — | + |
| «Sensorless speed and position estimation in a stepper motor» | + | н/д | н/д | — | — |
| «Processing back EMF signals of hybrid step motors» | + | — | — | — | + |

Заключение

В результате проведенного литературного обзора по тематике бездатчикового определения механических параметров шагового двигателя можно сделать следующие выводы:

1. точность и работоспособность методов на основе измерения противо-ЭДС [3, 7] имеют зависимость от скорости вращения вала и не способны работать на низких скоростях вращения;
2. методы на основе алгоритма фильтра Кальмана [4, 5, 6] имеют большую погрешность в несколько градусов;
3. ни в одной из рассмотренных работ не было проведено исследования по работоспособности ме-

тода при явлении пропуска шагов, которое возникает при работе вала с переменной нагрузкой, при ускорениях и при проблемах с источником питания драйвера;

4. отсутствует универсальный метод, который позволяет определять все механические параметры гибридного шагового двигателя, в том числе при работе вала с ускорениями.

В связи с выявленными недостатками, рассмотренных в различных работах, разработка универсального бездатчикового метода определения механических параметров остается актуальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Т. Кенио. — М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
2. Chirila, A. On the model of a Hybrid Stepper Motor / A. Chirila, I. Deaconu, V. Navrapescu, M. Albu. In: Proc IEEE international conference on industrial electronics, 2008. P. 496–501.
3. Lotthus R.M., Schweld S.A., McInroy J.E., Ota Y. Processing back EMF signals of hybrid step motors // Control engineering practice. — 1995. — Vol.3. Issue.1. — P.1–10.
4. Persson J., Perriard Y. Steady state Kalman filtering for sensorless control of hybrid stepper motors // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. — 2003. — Vol.2. — P.1174–1177.
5. Bendjedia M., Ait-Amirat Y., Walther B., Berthon A. Sensorless control of hybrid stepper motor // European conference on Power Electronics and Applications. — 2007. — P.1–10.
6. Ferrah A., Bani-Younes J.A.K., Bouzguenda M., Tami A. Sensorless speed and position estimation in a stepper motor // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. — 2007. — P.297–302.
7. Derammelaere S., Vervisch B., De Viaene J., Stockman K. Sensorless load angle control for two-phase hybrid stepper motors // Mechatronics. — 2017. — Vol.43. — P.6–17.

© Уляшев Артём Евгеньевич (artem.ulyashev@gmail.com); Старцев Андрей Эврикович (astarcev@ugtu.net);

Куделин Артём Георгиевич (akudelin@ugtu.net)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»