

**ВОЛКОВ А. В., ИОНОВА Е. И.**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЯ ПОТОКА**

### **ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РОТОРА**

### **СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

**Аннотация.** В статье представлен усовершенствованный метод определения температуры ротора для синхронных машин с постоянными магнитами при изменении динамических характеристик, управляя ослаблением основного магнитного потока. Рассматриваемый метод в значительной степени не зависит от условий охлаждения. Определение температуры ротора может происходить как в установившемся режиме с помощью эквивалентной тепловой модели, так и в динамическом режиме с введением в структуру эквивалентной тепловой модели наблюдателя температуры. Предложена тепловая модель, описывающая процессы изменения температуры электрической машины.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель с постоянными магнитами, постоянный магнит, температура, наблюдение потока, моделирование.

**VOLKOV A. V., IONOVA E. I.**

## **USE OF THE FLOW METHOD FOR DETERMINING TEMPERATURE**

### **OF ROTOR FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**

**Abstract.** The paper presents an improved method for determining the temperature of the rotor for synchronous machines with permanent magnets at changing dynamic characteristics, driving a weakening of the main magnetic flux. The method largely depends on the cooling conditions. In the steady mode the temperature of the rotor can be determined using the equivalent thermal model. In the dynamic mode the temperature of the rotor can be determined by the introduction of the observer temperature in the structure of the equivalent thermal model. The study presents a thermal model describing the processes of changing the temperature of the electric machine.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor, permanent magnet, temperature, flow monitoring, simulation.

Тяговые приводы, используемые в электрических и гибридных автомобилях, обычно используют синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) с использованием неодимового железа (NdFeB) в качестве материала постоянного магнита. Этот класс синхронных двигателей имеет два основных преимущества перед асинхронной машиной. Этими преимуществами являются более высокая плотность мощности и крутящего момента, а также более высокая эффективность при низких и средних скоростях. С другой стороны,

недостатком является температурная чувствительность материала постоянного магнита. Температура оказывает прямое влияние на остаточную плотность магнитного материала, поэтому исследование температуры помогает повысить точность определения расчетного крутящего момента [2].

Прямое измерение температуры постоянного магнита в большинстве случаев нецелесообразно, поскольку информация должна передаваться от ротора к статору предпочтительно с помощью какой-либо беспроводной технологии. В качестве альтернативы существуют три различных способа получения температуры ротора [1]:

- *тепловое моделирование;*
- *инжекционный метод;*
- *наблюдение потока.*

С одной стороны, тепловые процессы с сосредоточенными параметрами (ТПСП) дают возможность оценить не только температуру ротора, но также и температуру в нескольких критически важных местах двигателя (например, в лобной части обмотки). С другой стороны, метод ТПСР требует много времени с точки зрения идентификации параметра и основывается на предположениях относительно теплового состояния двигателя. Кроме того, методы не могут быть использованы при любых условиях, так как они вызывают ток нулевой последовательности и, следовательно, пульсацию крутящего момента. Это приведет к дополнительным потерям и усилению колебаний приводной цепи. Более того, работа на более высоких скоростях может быть проблематичной, если сигнал вводимого напряжения приводит к нецелесообразным рабочим циклам. Этот основной метод менее чувствителен к изменяющимся условиям охлаждения или напряжениям промежуточного контура. В дополнение к [1], блок определения температуры ротора улучшен для применения в широком диапазоне скоростей и крутящего момента во время динамической работы. Основопологающим условием для обеспечения точного наблюдения температуры является точная модель машины, так как коэффициент  $k_{Br}$  достаточно мал и поток постоянных магнитов имеет очень малое значение, чтобы получить температурную погрешность не ниже 5 К. Производительность и точность модели машины с дискретным временем сильно зависит от двух аспектов:

1. *физическое моделирование;*
2. *численное моделирование.*

В результате учёта этих двух аспектов получается точная дискретная модель СДПМ. Затем эта модель будет дополнена механизмом обратной связи, позволяющим оценивать изменения намагниченности и температуры ротора соответственно. Моделирование

показывает необходимость надлежащей временной дискретизации.

Модель состоит из трёх параметров, где нужно идентифицировать только два. Хотя  $R_s$  (сопротивление статора) довольно просто идентифицировать, нелинейная функция  $f_{dq}^{-1}(\psi_{dq})$  требует немалых усилий для преобразования. Температурный коэффициент  $k_{Br}$  может быть взят из данных паспорта или экспериментальных измерений при холостом ходе.

При данном методе используется модель согласно системе уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{dq,k} = R^{-1}(\varphi_k) \left[ \psi_{dq,k-1} + T_a u_{dq,k-1} - T_a R \left( \frac{\varphi}{2} k \right) R_s i_{dq,k-1} \right]; \\ i_{dq,k} = f_{dq}^{-1}(\psi_{dq,k}); \\ \varphi_{k+1} = \varphi_{k+1} - \varphi_k \approx \omega_k T_a; \\ R(\varphi_{k+1}) = R(\varphi_{k+1}) R^{-1}(\varphi_k), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $u$  – напряжение статора,  $i$  – ток статора,  $\omega$  – угловая скорость,  $\psi$  – связанный поток, а  $T$  – крутящий момент машины,  $R_s$  – сопротивление статора и обычно нелинейное соотношение  $f_{dq}^{-1}$  между статором и потоком.

Далее добавляется обратная связь, основанная на ошибке между наблюдаемым и измеренным током:

$$\hat{\psi}_{dq,k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} k_i T_a (i_{dq,k} - \hat{i}_{dq,k}) + \hat{\psi}_{dq,k-1}. \quad (2)$$

Здесь  $\hat{\psi}$  и  $\hat{i}$  обозначают наблюдаемые величины. Наблюдаемые токи рассчитываются как:

$$\hat{i}_{dq,k} = f_d^{-1}(\hat{\psi}_{dq,k} + \hat{\psi}_{dq,k,\omega}). \quad (3)$$

Из выражения (7) абсолютная температура ротора может быть вычислена через:

$$\hat{\theta}_{r,k} = \frac{\hat{\psi}_{d,k}}{k_{Br} \psi_{p,0}} + \theta_{r,0}. \quad (4)$$

Полная структурная схема наблюдателя данного метода изображена на рисунке 1.

Затем необходимо исследовать динамику наблюдателя, чтобы получить соответствующее правило выбора коэффициента обратной связи  $k_i$ .

$$G_{RTO}(z) = \frac{\hat{\Psi}_d}{\Psi_d} = \frac{m_3 z^3 + m_2 z^2 + m_1 z + m_0}{n_3 z^3 + n_2 z^2 + n_1 z + n_0} \quad (5)$$

Передаточная функция дискретного времени (5) действительна, если выполняется линейная зависимость (6)

$$\Psi_{dq} = f_{dq}(i_{dq}) = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Psi_p \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где индуктивность  $L_d$  и  $L_q$  считаются постоянными в данной рабочей точке. Кроме того, предположение о постоянной скорости  $\omega$  должно быть выполнено. Коэффициенты для выражения (5) задаются как:

$$\begin{aligned} m_3 &= 0; \\ m_2 &= -L_q T_a k_i; \\ m_1 &= 2L_q T_a k_i \cos(\omega T_a) - R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ m_0 &= R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_q T_a k_i; \\ n_3 &= L_d L_q; \\ n_2 &= L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_q T_a k_i - 2L_d L_q \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - L_d L_q + L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ n_1 &= R_s^2 T_a^2 + L_d L_q + 2L_d L_q \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) + 2L_q T_a k_i \cos(\omega T_a) - \\ &\quad - 2L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - 2L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right); \\ n_0 &= R_s T_a^2 k_i \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) - L_d L_q - L_q T_a k_i - \\ &\quad - R_s^2 T_a^2 + L_d R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right) + L_q R_s T_a \cos\left(\frac{\omega T_a}{2}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из (5) и (7), поведение зависит исключительно от параметров машины и скорости. Точка максимального значения фазного тока и напряжения теоретически не имеет

значения. На практике, однако, эти величины будут играть определенную роль, главным образом, из-за ошибок измерения и дискретизации (ошибка квантования). Структура наблюдателя приведена на рисунке 1. Диаграмма для постоянных параметров машины приведена на рисунке 2.

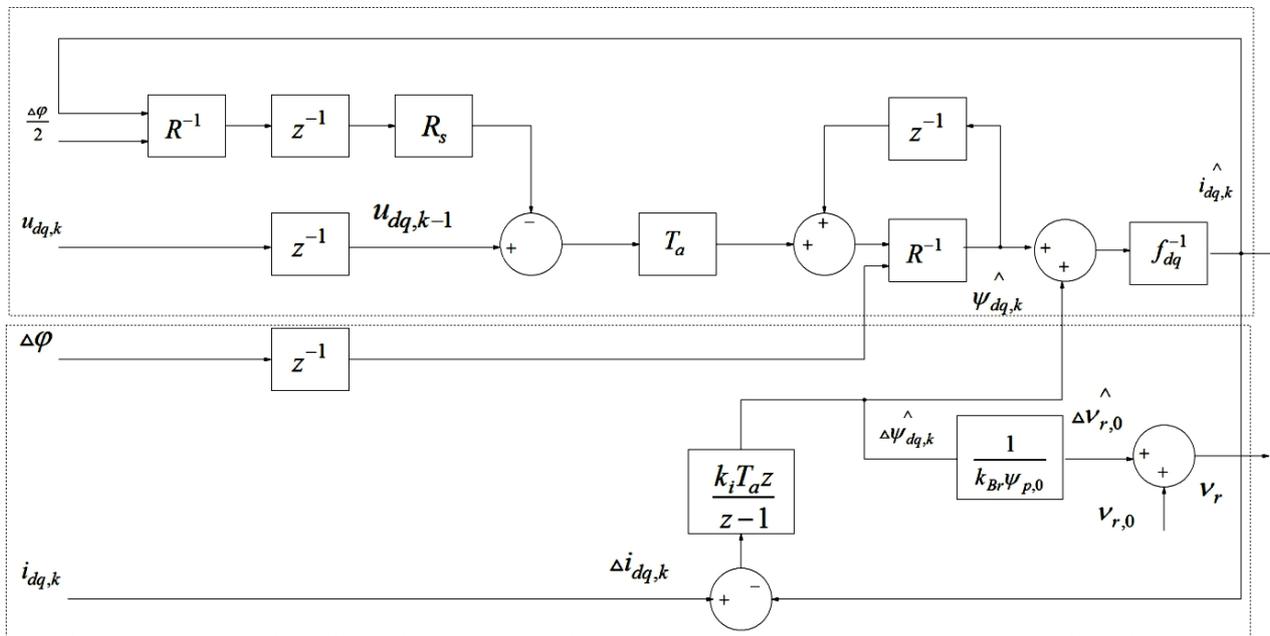


Рис. 1. Структура наблюдателя: верхняя часть модели соответствует выражению (1); нижняя часть служит для создания структуры наблюдателя.

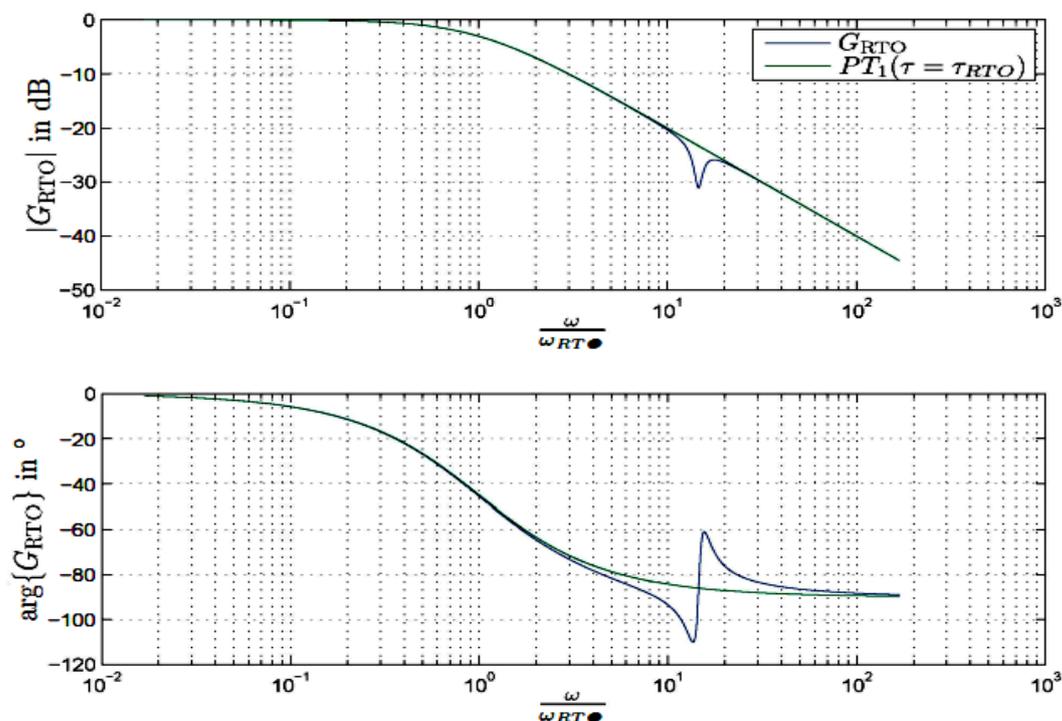


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ передаточной функции  $G_{RTO}$  по сравнению с низкочастотным фильтром первого порядка с постоянной времени  $\tau_{RTO}$ .

**Вывод.** Предложен метод определения температуры ротора с использованием дополнительного наблюдателя потока. В качестве обязательного условия была введена модель дискретного электродвигателя. Результаты моделирования показали значительно лучшую дискретизацию по сравнению со стандартными уравнениями первого порядка. Рассмотренный метод может быть легко реализован на часто используемых платформах реального времени, и усилия по идентификации параметров приемлемы. Результаты измерений оказались удовлетворительными для наблюдателей в широком диапазоне скоростей и крутящего момента. Точность наблюдателя сильно коррелирует со скоростью машины и для очень низких скоростей, метод не может быть применен. Это не очень критично, так как тепловая динамика ротора довольно медленная и не значительно возрастает в этом диапазоне скоростей. На средних и высоких скоростях была достигнута абсолютная ошибка наблюдателя ниже 5 К. Таким образом, наблюдатель температуры ротора, по-видимому, применим к широкому спектру тяговых применений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А. В. Определение температуры постоянных магнитов в синхронном двигателе с помощью эквивалентной тепловой модели // *Успехи современной науки.* – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 110–118.
2. Sebastian T. Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors Using NdFeB Magnets // *IEEE Transactions on Industry Applications.* – 1995. – Vol. 31. – Iss. 2. – pp. 353–357.
3. Kral C., Haumer A., Lee S. B. A Practical Thermal Model for the Estimation of Permanent Magnet and Stator Winding Temperatures // *IEEE Transactions on Power Electronics.* – 2014. – Vol. 29, No. 1. – pp. 455–464.
4. Huber T., Peters W., Backer L. Monitoring Critical Temperatures in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Low Order Thermal Models // *International Power Electronics Conference.* – Hiroshima, 2014. – pp. 1508–1515.