

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Введение.** Шаговые двигатели (ШД) широко применяются при построении устройств позиционирования научного и технического назначения. Конечность шага и точность позиционирования ротора 3-5 % относительно заданного угла, а также возможность удерживать позицию при номинальной нагрузке делает их применение выгодным, а иногда и незаменимыми в системах автоматизации и управления различными технологическими процессами.

**Постановка задач и исследования.**

Моделирование и исследование динамических и статических режимов работы шаговых электрических машин.

**Результаты исследования.**

Рассмотрим обобщенную математическую модель реактивного ШД [1]. Уравнение равновесия одной фазы статора имеет вид

$$i_k R_k + \frac{d\psi_k}{dt} = u_k, \quad (1)$$

где потокосцепление фазы статора  $\psi_k$  определяется выражением

$$\psi_k = L_k(\theta) i_k \quad (2)$$

и зависит от индуктивности фазы и тока в этой фазе.

Так как в переходных режимах изменяется индуктивность  $L_k$  и ток  $i_k$  фазы, уравнение (1) можно представить следующим образом

$$i_k R_k + i_k \frac{dL_k(\theta)}{dt} + L_k(\theta) \frac{di_k}{dt} = u_k \quad (3)$$

или с учетом того, что  $\frac{dL_k(\theta)}{dt} = \frac{\partial L_k(\theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}$ ,  $\frac{d\theta}{dt} = \omega$  окончательно получим

$$i_k R_k + i_k \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} \omega + L_k(\theta) \frac{di_k}{dt} = u_k. \quad (4)$$

Изменения индуктивности  $L_k(\theta)$  в фазе с учетом насыщения магнитной цепи происходит по гармоническим законам, близким к линейным. При условии, что число полюсов на роторе в два раза больше, чем на статоре, период повторения  $\Delta\theta = \frac{\pi}{4m^2}$ , где  $m$  – число фаз статора,  $\Phi^*$  и  $I^*$  – представлены в относительных единицах.

$$L_k(\theta) = \begin{cases} \frac{L_{\min}}{k\Phi^*(I^*)}, & \text{при } \Delta\theta < \theta < \frac{2\pi}{(2m)^2}(k-1) + \Delta\theta; \\ \frac{L_{\min}}{k\Phi^*(I^*)} + \frac{(L_{\max} - L_{\min})(2m)^2}{2\pi k\Phi^*(I^*)} \left( \theta - \frac{2\pi}{(2m)^2}(k-1) + \Delta\theta \right), & \text{при } \frac{2\pi}{(2m)^2}(k-1) + \Delta\theta < \theta < \frac{2\pi}{(2m)^2}k + \Delta\theta; \\ \frac{L_{\max}}{k\Phi^*(I^*)} + \frac{(2m)^2(L_{\min} - L_{\max})}{2\pi k\Phi^*(I^*)} \left( \theta - \frac{2\pi}{(2m)^2}k + \Delta\theta \right), & \text{при } \frac{2\pi}{(2m)^2}k + \Delta\theta < \theta < \frac{2\pi}{(2m)^2}(k+1) + \Delta\theta; \\ \frac{L_{\min}}{k\Phi^*(I^*)}, & \text{при } \frac{2\pi}{(2m)^2}(k+1) + \Delta\theta < \theta < \frac{\pi}{4} + \Delta\theta. \end{cases} \quad (5)$$

Электромагнитный момент одной фазы ШД определяется выражением

$$M_k = i_k^2 \frac{\partial L_k}{\partial \theta}, \quad (6)$$

а суммарный электромагнитный момент

$$M = \frac{p}{2} \sum_{k=1}^m M_k. \quad (7)$$

Уравнение движения ротора двигателя с учетом вязкого трения

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + M_c = M, \quad (8)$$

где  $D$  – коэффициент вязкого трения,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ .

График изменения индуктивности в фазе 1 статора в соответствии с зависимостью (5) показан на рисунке 1.

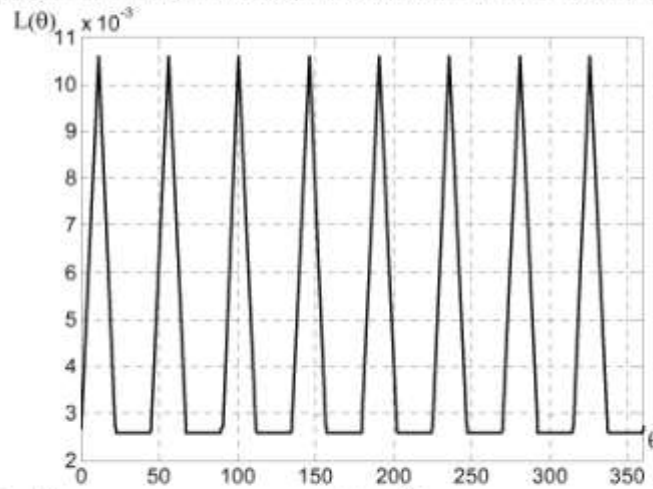


Рис.1 Зависимость индуктивности фазы №1 статора от угла поворота

В соответствии с уравнениями (1)–(8) структурная схема одной фазы шагового двигателя с учетом насыщения будет иметь вид, показанный на рисунке 2.

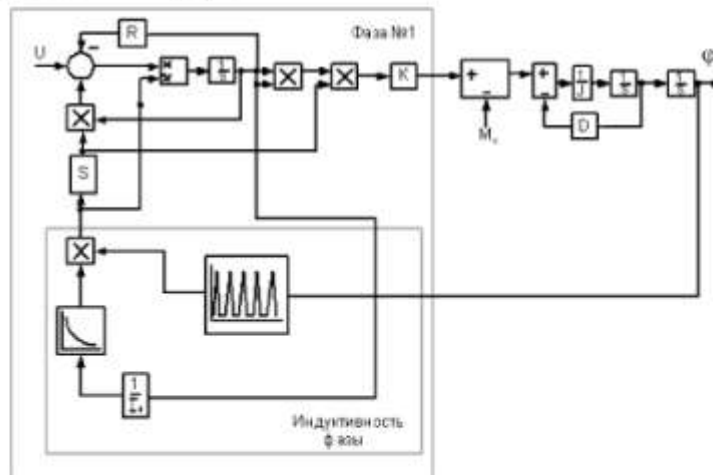


Рис 2. Структурная схема одной фазы шагового двигателя с учетом насыщения.

Учитывая, что будет рассматриваться разомкнутая система преобразователь частоты – шаговый двигатель (ПЧ-ШД), функциональную схему системы управления ШД при фиксации положения ротора на заданном уровне можно представить в виде, изображенном на рисунке 3, где приняты следующие обозначения: ПЧ – преобразователь частоты, ВС – внешний сигнал, БЛК – блок логической коррекции, ШД – шаговый двигатель.

При моделировании системы ПЧ-ШД, показанной на рисунке 3, получены переходные процессы, представленные на рисунках 4 и 5.

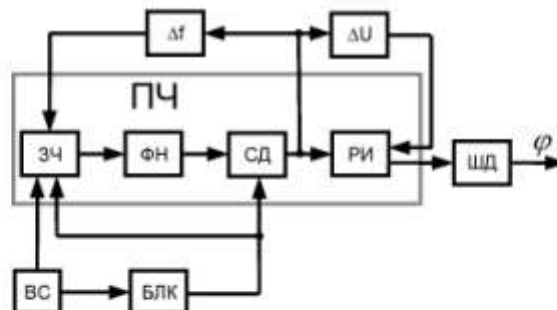


Рис. 3 Функциональная схема системы ПЧ – ШД.

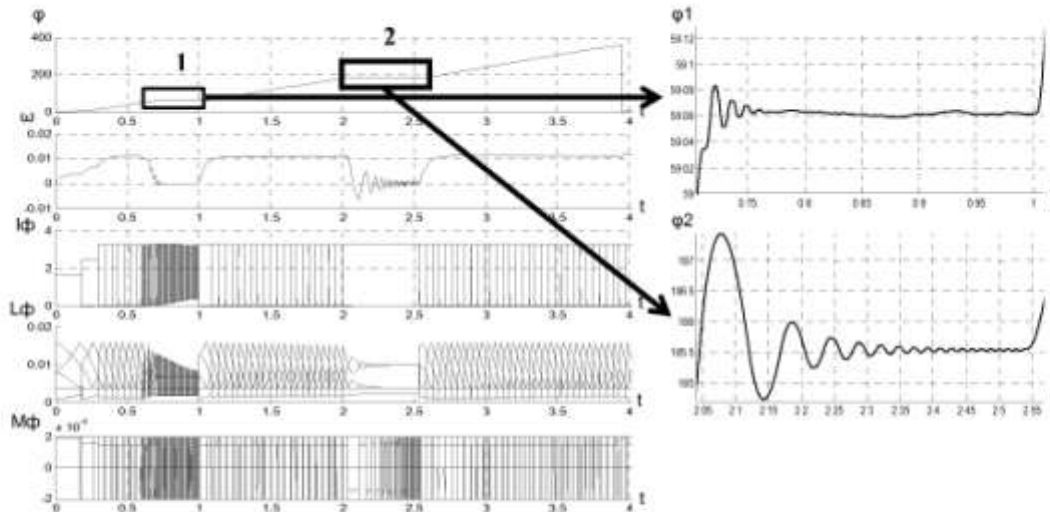


Рис. 4 Переходные процессы системы ПЧ-ШД при фиксации положения ротора на заданном уровне.

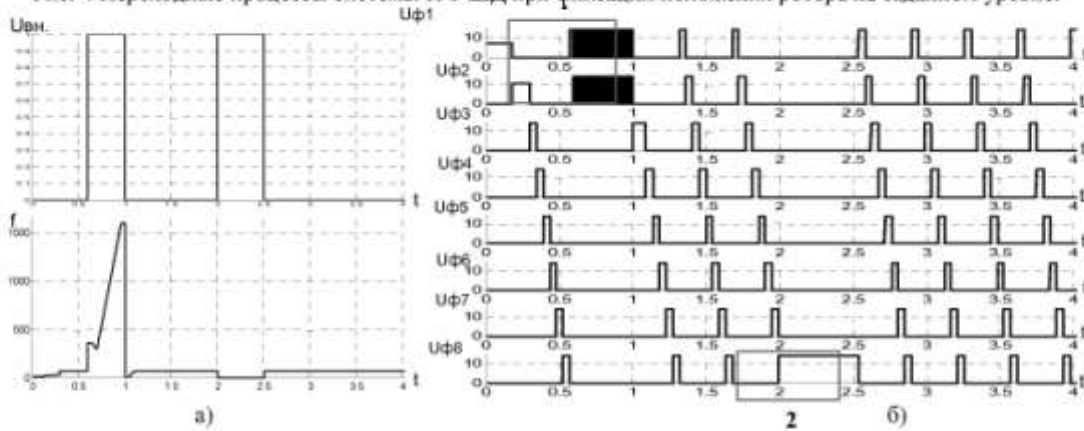


Рис. 5 Переходные процессы ПЧ при фиксации положения ротора на заданном уровне.

Из рисунка 4 видно, что в конце участка 1 двигатель отработал угол  $59,06^\circ$ , при этом ПЧ подал на фазы статора 9 импульсов, после чего вошел в скользящий режим (рис. 5б), что позволяет осуществить позиционирование ротора в любом заданном угловом положении. Математический расчет показывает

$$\varphi = h_0 + h \cdot n + \left( \frac{h}{\alpha} \right), \quad (9)$$

где:  $h_0$  – начальное положение ротора, град.;  $h$  – полный шаг двигателя, град.;  $n$  – количество импульсов, поданных на обмотки статора двигателя до скользящего режима;  $\alpha$  – любое положительное число больше единицы.

$$\varphi = 5,625^\circ + 5,625^\circ \cdot 9 + \left( \frac{5,625^\circ}{2} \right) = 59,0625^\circ.$$

На участке 2 угол позиционирования составил  $185,6^\circ$ , при этом двигатель отработал 32 импульса и зубец ротора зафиксировался под полюсом статора (рис. 5б). Соответственно математический расчет показывает

$$\varphi = h_0 + h \cdot n, \quad (10)$$

$$\varphi = 5,625^\circ + 5,625^\circ \cdot 32 = 185,625^\circ.$$

**Выводы.** Питание шагового двигателя от преобразователя частоты, обеспечивающего работу в скользящем режиме, позволяет осуществить позиционирование ротора в любом заданном угловом положении, что создает предпосылки для разработки замкнутых систем управления явнополюсными реактивными машинами.

#### Литература

1. М.Г. Чиликин. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями, М., «Энергия», 1971. 624с.