

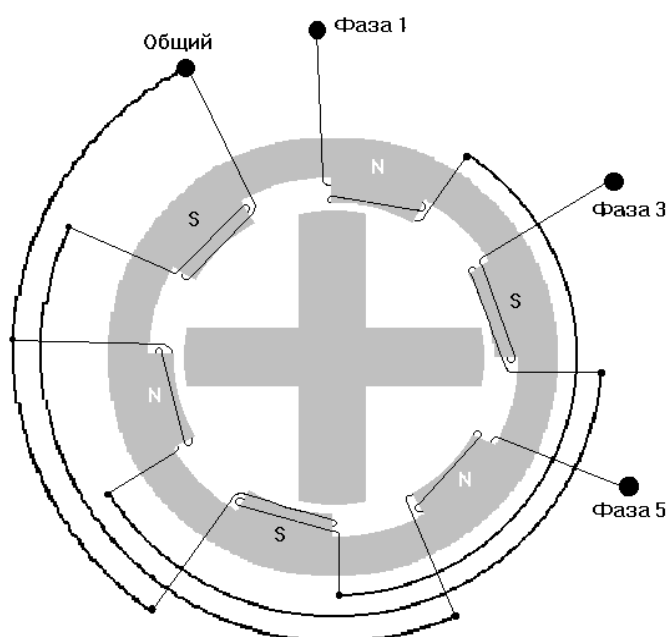
## Особенности работы шагового двигателя.

### 1.1. Устройство.

Двигатель ШД5, по числу обмоток управления (числу фаз), относится к многофазным (имеет шесть фаз) шаговым двигателям, с электромагнитной связью ротора и статора. Такие двигатели получили наибольшее распространение по сравнению с двигателями, имеющими механическую<sup>1</sup> связь ротора и статора, ввиду лучших динамических характеристик. По своей природе они являются синхронными двигателями, сохраняющими синхронизм не только при движении ротора, но и при пуске, торможении, реверсе, а также допускают длительную фиксированную остановку ротора, когда по обмоткам ротора проходит постоянный ток.

По типу магнитной системы ШД5 относится к параметрическим двигателям. Он имеет зубчатый ферромагнитный ротор, выполняющий роль модулятора магнитной проводимости воздушного зазора между статором и ротором.

По способу возбуждения ШД5 относится к классу реактивных двигателей, так как ротор не имеет возбуждения, и независимо от направления тока, одинаково ориентируется относительно возбужденного полюса.



*Рис. 1. Поперечная геометрия шагового двигателя*

---

<sup>1</sup>. Такие двигатели описываются в литературе [11].

По моменту, развиваемому на валу, ШД5 относится к серводвигателям (его момент составляет 0.14 Н/м), а по характеру перемещения к поворотному типу [2]. Таким образом, при подаче на двигатель импульсов управления, он совершает вращательное

движение. Как это происходит, становится понятно при рассмотрении устройства шагового двигателя.

Статор шагового двигателя (рис. 1) с реактивным ротором имеет выступающие полюса, вокруг которых укладываются обмотки, соединяемые в фазы. Ротор представляет собой многополюсную зубчатую конструкцию. Обмотки двух противоположных полюсов статора соединяются последовательно и при протекании по ним тока образуют полюса противоположной полярности. При этом ротор занимает фиксированное положение, соответствующее наибольшей магнитной проводимости пути замыкания магнитного потока статора для данной возбуждённой фазы. При подаче импульса управления в следующую фазу ротор занимает новое фиксированное положение, совершая при этом шаг

$$\alpha = 2\pi/(z_p m) \quad (1)$$

где  $z_p$  - число зубцов ротора;  $m$  – число обмоток управления на статоре, пространственно сдвинутых относительно друг друга или число тактов коммутации схемы управления.

Если отклонить ротор, находящийся в некотором фиксированном положении на некоторый угол, то магнитная проводимость уменьшается и возникает синхронизирующий момент, который будет стремиться вернуть ротор в прежнее положение. Количественно электромагнитный момент шагового двигателя можно представить как степень изменения сосредоточенной в воздушном зазоре электромагнитной энергии и угла отклонения ротора от равновесного состояния:

$$M_m = dE_m/d\alpha \quad [5]$$

Электромагнитная энергия в воздушном зазоре шагового двигателя является периодической функцией угла рассогласования ротора  $E_m = f(\alpha_e)$ , а связь между углом рассогласования и геометрическим углом определяется выражением

$$\alpha_e = (z_p \alpha)/2 \quad (2)$$

где  $\alpha_e$  – угол рассогласования,  $\alpha$  – геометрический угол. Электромагнитную энергию в воздушном зазоре  $E_m$  можно вычислить через полную магнитную проводимость воздушного зазора  $\lambda$ . Для этого представим обмотку статора в виде тора, имеющего разрыв в виде воздушного зазора [6]. Таким образом, выражение электромагнитного момента двигателя принимает вид:

$$M_m = \frac{z_p}{2} \frac{dE_m(\alpha_e)}{d\alpha_e}, \text{ где } E_m = \frac{L_m I^2}{2} \quad L_m = \frac{\Phi w}{I} \quad \frac{F}{r_m} \Phi = \frac{F}{r_m} = F\lambda,$$

где  $I$  – ток в обмотке двигателя,  $\Phi$  – магнитный поток через воздушный зазор,  $w$  – число витков в обмотке статора,  $F$  – магнитодвижущая сила управляющей обмотки статора на пару полюсов ( $F = wI$ ),  $r_m$  – полное магнитное сопротивление воздушного зазора,  $L_m$  –

эквивалентная индуктивность воздушного зазора [7]. Таким образом, окончательно, выражение электромагнитного момента двигателя примет вид:

$$M_m = \frac{z_p}{4} w I^2 \frac{d\lambda}{d\alpha_e} \quad (3)$$

Если пренебречь насыщением магнитной системы двигателя и пространственными высшими гармониками в кривой магнитного поля в воздушном зазоре, то выражение магнитной проводимости зазора будет:

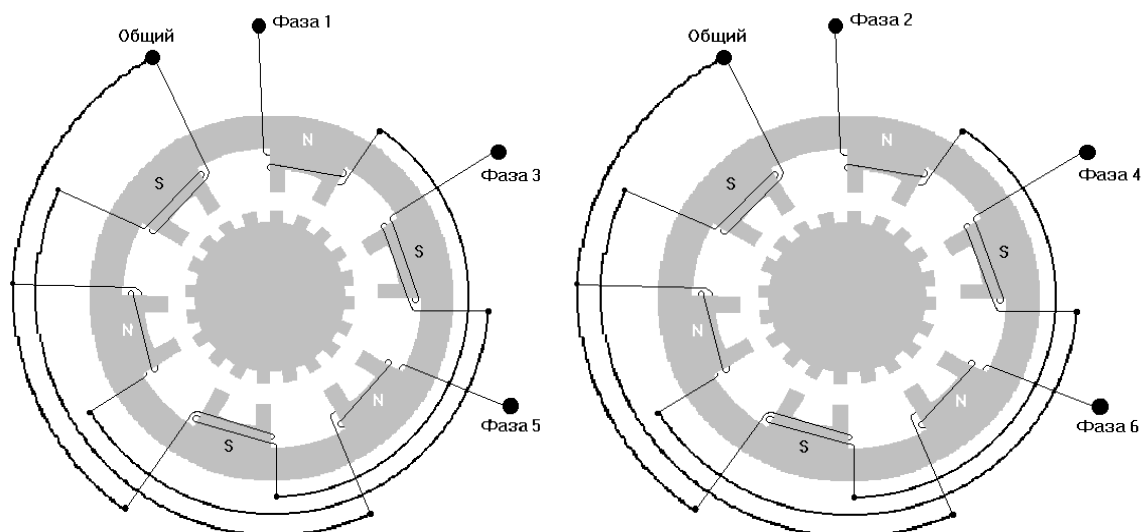
$$\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_d + \lambda_q) + \frac{1}{2}(\lambda_d - \lambda_q)\cos(2\alpha_e) \quad [2]$$

где  $\lambda_d$  и  $\lambda_q$  – полные магнитные проводимости воздушного зазора шагового двигателя по продольной и поперечной осям.

Уравнение статического синхронизирующего момента шагового двигателя, полученное путём подстановки [2] в (3):

$$M_m = 0.25 z_p w I^2 (\lambda_d - \lambda_q) \sin(2\alpha_e) \quad (4)$$

Переходя, непосредственно к конструктивным особенностям ШД5 начнём с того, что этот шаговый двигатель является многостаторным (он имеет два статора). *Рис. 2.*



*Поперечная геометрия ШД5 и схемы соединения обмоток.*

У многостаторного двигателя обмотки управления, находящиеся в разных статорах, не имеют между собой магнитной связи, располагаясь в двух отдельных пакетах, смещенных относительно друг друга на  $2\pi/(z_p m)$ , рад. Размещение фазных обмоток на отдельных пакетах статора усложняет конструкцию двигателя и увеличивает его габариты. Но зато при такой конструкции многофазного двигателя удастся избежать нагромождения множества обмоток в одном статоре.

Шестифазный редукторный шаговый двигатель ШД5 с симметричной магнитной системой [2] состоит из двух шихтованных статоров, которые последовательно расположены вокруг одного ротора (рис. 2).

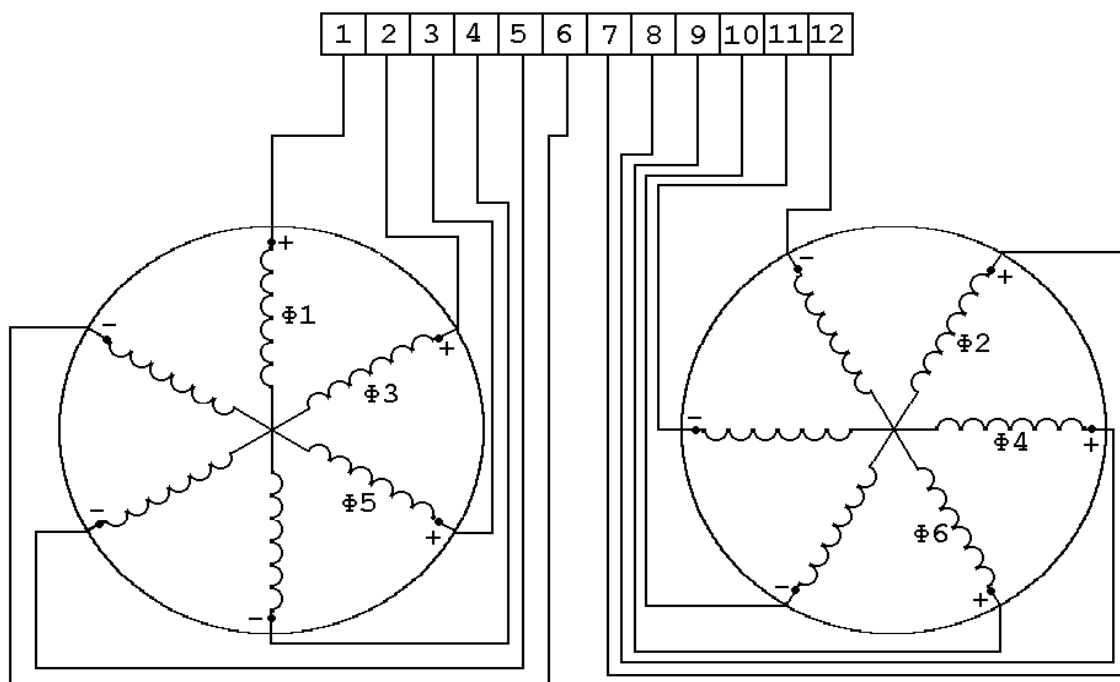


Рис. 3. Схема соединения обмоток в фазы ШД5.

Статоры сдвинуты друг относительно друга (по оси ротора) на угол  $2\pi/(mz_p)$  рад. В каждом статоре имеется шесть пазов, в которые уложены 12 сосредоточенных обмоток управления, соединяемых в двигателе, в шесть электрически не связанных фаз (рис. 3). На полюсах статора расположены мелкие зубцы. Ротор представляет собой цилиндр с мелкими зубцами, причем ширина зубцов по наружному диаметру ротора равна ширине зубцов статора по расточке. Работа двигателя осуществляется следующим образом. Положим, что питание одновременно подается в две соседние фазы, например, 1 и 3 (рис. 2). При этом



*Рис. 4. Фотография шагового двигателя ШД-5Д1МУЗ.*

магнитный поток  $\Phi$  замыкается по кратчайшему пути через соседние полюса. Ось результирующего магнитного поля ориентируется между полюсами 1 и 3, а ротор занимает положение, соответствующее максимальной проводимости воздушного зазора, причем, относительно пары полюсов 2 – 4 положение максимальной проводимости между зубцами статора и ротора будет сдвинуто на  $\frac{1}{6}$  зубцового деления. При снятии питания с фаз 1 и 3, и подаче его в фазы 2 и 4 ось результирующего магнитного потока смещается на  $\frac{\pi}{6}$  рад., а ротор поворачивается на угол, соответствующий новому положению максимальной магнитной проводимости – отрабатывает шаг. Для равномерной отработки шагов необходимо, чтобы между зубцами ротора и статора под очередным полюсом был

угловой сдвиг, равный  $2\pi/(mz_p)$  рад. При этом движение ротора осуществляется последовательным переключением фаз таким образом, чтобы ротор при каждом переключении перемещался на один и тот же угол.