

УДК 62.83

В.А. Войтенко, канд. техн. наук

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ОБМОТКИ СТАТОРА ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЯМ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрена математическая модель синхронного двигателя, предназначенная для исследования зависимости индуктивности двух последовательно включённых фаз обмотки статора от угла поворота вала. Предложен метод оценки индуктивности обмотки статора синхронного двигателя по продольной и поперечной осям обмотки возбуждения.

Ключевые слова: синхронный двигатель, индуктивность, намагничивающие силы, магнитный поток.

V.A. Voytenko, PhD.

EXPLICIT-POLE SYNCHRONOUS MOTOR STATOR WINDING INDUCTANCE MEASUREMENT METHOD APPLIED TO LONGITUDINAL AND TRANSVERSAL AXES OF EXCITATION WINDING

The mathematical model of synchronous engine, intended for research of inductance's dependence of stator puttee's two consistently included phases from the corner of billow turning, is considered. The method of estimation of stator puttee's inductance of synchronous engine and longitudinal and transversal to the axes of puttee of excitation has been offered.

Keywords: synchronous engine, inductance, magnetizing forces, magnetic stream.

В.А. Войтенко, канд. техн. наук

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКТИВНОСТІ ОБМОТКИ СТАТОРА ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА ПО ПОДОВЖНІЙ І ПОПЕРЕЧНІЙ ОСЯМ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

Розглянуто математичну модель синхронного двигуна, яка призначена для дослідження залежності індуктивності двох послідовно увімкнених фаз обмотки статора від кута повороту вала. Запропоновано метод оцінки індуктивності обмотки статора синхронного двигуна по подовжній і поперечній осям обмотки збудження.

Ключові слова: синхронний двигун, індуктивність, намагнічуючі сили, магнітний потік.

При разработке математических моделей явнополусных синхронных двигателей (СД), а также при проектировании и исследовании замкнутых систем управления на базе таких СД необходимо знать их параметры [1,2,3]. При этом часто значений параметров, приведенных в каталогах или в паспорте СД, недостаточно для его моделирования. К таким параметрам можно отнести индуктивность обмотки статора СД по продольной (L_d) и по поперечной (L_q) осям обмотки возбуждения. В связи с этим необходимо разработать методику экспериментального определения этих параметров.

Для определения индуктивности L_d и L_q необходимо оценить значение индуктивности двух последовательно включённых обмоток статора: A и B , A и C или B и C . Для определённости рассмотрим суммарную индуктивность последовательно включенных обмоток статора A и B ($L_{AB\Sigma}$). Поскольку фазы A и B обмотки статора со-

единены последовательно, то через них будет протекать один и тот же ток. Причём если через фазу A этот ток протекает в условно положительном направлении (от начала обмотки к её концу), то через фазу B этот же ток протекает в условно отрицательном направлении (от конца обмотки к её началу). Если количество витков в фазе обмотки статора обозначить W_i , то ток i_A в фазе A создаёт намагничивающую силу $W_A i_A$, направление которой совпадает с положительным направлением оси A . Ток $i_B=i_A$ в фазе B создаёт намагничивающую силу ($-W_B i_A$), направление которой противоположно положительному направлению оси B . Векторы намагничивающих сил, создаваемых фазами A и B обмотки статора, показаны на рис. 1. Здесь же показана система координат ($d-0-q$), неподвижная относительно обмотки возбуждения. Ось d направлена по продольной оси обмотки возбуждения, а ось q – по поперечной. Угол поворота системы координат ($d-0-q$) будем отсчитывать от оси A в положи-

тельном направлении (против часовой стрелки) и обозначим буквой Θ . Относительно системы координат (d - 0 - q) положительные углы будем отсчитывать по часовой стрелке.

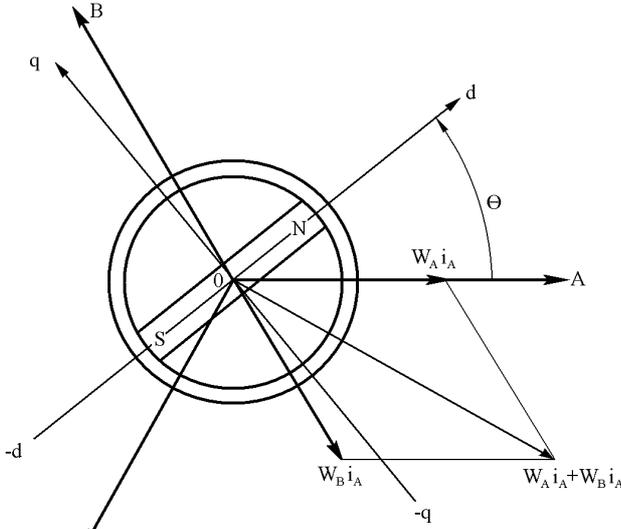


Рис. 1. Векторы намагничивающих сил, создаваемых фазами A и B обмотки статора СД

Намагничивающие силы $W_A i_A$ и $W_B i_B$ разложим на две составляющие, направленные по осям d и q :

$$\begin{cases} (W_A i_A)_d = W_A i_A \cos \Theta; \\ (W_A i_A)_q = W_A i_A \cos(\frac{\pi}{2} + \Theta) = -W_A i_A \sin \Theta. \end{cases}$$

$$\begin{cases} (W_B i_B)_d = W_B i_B \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}); \\ (W_B i_B)_q = W_B i_B \cos(\frac{\pi}{2} + \Theta + \frac{\pi}{3}) = -W_B i_B \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}). \end{cases}$$

Определим суммарные намагничивающие силы, создаваемые обмотками A и B, направленные по осям d и q :

$$\begin{cases} (W_A i_A)_d + (W_B i_B)_d = W_A i_A \cos \Theta + W_B i_B \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}); \\ (W_A i_A)_q + (W_B i_B)_q = -W_A i_A \sin \Theta - W_B i_B \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}). \end{cases}$$

Значения магнитных потоков, которые направлены по осям d и q , можно определить по формулам:

$$\begin{cases} \Phi_{ABd} = \Lambda_d [W_A i_A \cos \Theta + W_B i_B \cos(\Theta + \frac{\pi}{3})]; \\ \Phi_{ABq} = \Lambda_q [-W_A i_A \sin \Theta - W_B i_B \sin(\Theta + \frac{\pi}{3})], \end{cases}$$

где Λ_d , Λ_q – магнитная проводимость магнитной цепи СД по осям d и q [4].

Составляющие магнитных потоков Φ_{ABd} и Φ_{ABq} на ось A:

$$\begin{cases} \Phi_{ABd} \cos \Theta = \Lambda_d [W_A i_A \cos \Theta + W_B i_B \cos(\Theta + \frac{\pi}{3})] \cos \Theta; \\ \Phi_{ABq} \cos(\frac{\pi}{2} + \Theta) = \Lambda_q [-W_A i_A \sin \Theta - W_B i_B \sin(\Theta + \frac{\pi}{3})] (-\sin \Theta). \end{cases}$$

Магнитный поток по оси A определяется выражением

$$\begin{aligned} \Phi_{A\Sigma} &= \Phi_{ABd} \cos \Theta + \Phi_{ABq} \cos(\frac{\pi}{2} + \Theta) = \\ &= \Lambda_d [W_A i_A \cos \Theta + W_B i_B \cos(\Theta + \frac{\pi}{3})] \cos \Theta + \\ &+ \Lambda_q [W_A i_A \sin \Theta + W_B i_B \sin(\Theta + \frac{\pi}{3})] \sin \Theta. \end{aligned}$$

Потокоцепление фазы A обмотки статора СД

$$\begin{aligned} \Psi_{A\Sigma} &= W_A \Phi_{A\Sigma} = \\ &= \Lambda_d W_A^2 i_A [\cos \Theta + \frac{W_B}{W_A} \cos(\Theta + \frac{\pi}{3})] \cos \Theta + \\ &+ \Lambda_q W_A^2 i_A [\sin \Theta + \frac{W_B}{W_A} \sin(\Theta + \frac{\pi}{3})] \sin \Theta. \end{aligned}$$

Если принять $W_B = W_A$ и обозначить индуктивность обмотки статора по продольной оси $L_d = \Lambda_d W_A^2$, а индуктивность обмотки статора по поперечной оси $L_q = \Lambda_q W_A^2$, то индуктивность фазы A при протекании тока через фазы A и B будет определяться выражением

$$\begin{aligned} L_{A\Sigma} &= \frac{d\Psi_{A\Sigma}}{di_A} = L_d [\cos \Theta + \cos(\Theta + \frac{\pi}{3})] \cos \Theta + \\ &+ L_q [\sin \Theta + \sin(\Theta + \frac{\pi}{3})] \sin \Theta. \end{aligned}$$

После тригонометрических преобразований получим

$$L_{A\Sigma} = \frac{3(L_d + L_q)}{4} + \frac{\sqrt{3}(L_d - L_q)}{2} \cos(\frac{\pi}{6} + 2\Theta).$$

Аналогично можем определить индуктивность фазы B:

$$L_{B\Sigma} = \frac{3(L_d + L_q)}{4} - \frac{\sqrt{3}(L_d - L_q)}{2} \sin 2\Theta.$$

Суммарная индуктивность фаз A и B

$$L_{AB\Sigma} = L_{A\Sigma} + L_{B\Sigma} = \frac{3(L_d + L_q)}{2} + \frac{\sqrt{3}(L_d - L_q)}{2} \cos\left(\frac{\pi}{6} + 2\Theta\right) - \frac{\sqrt{3}(L_d - L_q)}{2} \sin 2\Theta.$$

После преобразований

$$L_{AB\Sigma} = L_{A\Sigma} + L_{B\Sigma} = \frac{3(L_d + L_q)}{2} + \frac{3(L_d - L_q)}{2} \cos\left(\frac{\pi}{3} + 2\Theta\right). \quad (1)$$

С помощью (1) можно рассчитать значения суммарной индуктивности $L_{AB\Sigma}$ при некоторых значения угла поворота вала двигателя Θ , которые приведены ниже:

Θ	$L_{AB\Sigma}$
0.	$\frac{3(3L_d + L_q)}{4}$
$\pi/6$	$\frac{3(L_d + 3L_q)}{4}$
$\pi/3$	$3L_q$
$\pi/2$	$\frac{3(L_d + 3L_q)}{4}$
$2\pi/3$	$\frac{3(L_d + L_q)}{2}$
$5\pi/6$	$3L_d$
π	$\frac{3(3L_d + L_q)}{4}$

Из приведенных данных следует, что при $\Theta = \pi/3$ суммарная индуктивность фаз A и B равна $3L_q$, а при $\Theta = 5\pi/6$ – $3L_d$. Как видно из рисунка, при $\Theta = \pi/3$ суммарная намагничивающая сила ($W_A i_A + W_B i_B$), создаваемая обмотками A и B , совпадает с осью q , а при $\Theta = 5\pi/6$ совпадает с осью d .

Докажем, что суммарная индуктивность $L_{AB\Sigma}$ имеет минимальное значение при $\Theta = \pi/3$ и максимальное – при $\Theta = 5\pi/6$. Поскольку воздушный зазор между сердечником ротора и статора вдоль продольной оси меньше, чем вдоль поперечной, то магнитная проводимость Λ_d больше Λ_q . Вследствие этого $L_d > L_q$. Поэтому можно принять, что $L_d/L_q > 1$. С учётом этого на основании выражения (1) можно записать:

$$\frac{L_{AB\Sigma}}{3L_q} = \frac{L_d/L_q + 1}{2} + \frac{L_d/L_q - 1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{3} + 2\Theta\right). \quad (2)$$

Поскольку $(L_d/L_q - 1)/2 > 0$, то при $\cos(\frac{\pi}{3} + 2\Theta) = -1$ выражение (2) будет

иметь минимальное значение:

$$\left(\frac{L_{AB\Sigma}}{3L_q}\right)_{\text{МИН}} = \frac{L_d/L_q + 1}{2} - \frac{L_d/L_q - 1}{2} = \frac{L_d}{L_q} > 1. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при любом значении угла поворота вала двигателя Θ $L_{AB\Sigma} > 3L_q$. С учётом этого и результатов, приведенных в таблице, можно утверждать, что минимальное значение суммарной индуктивности $L_{AB\Sigma}$ составляет $3L_q$.

Аналогично можно показать, что при любом значении угла Θ

$$\left(\frac{L_{AB\Sigma}}{3L_d}\right)_{\text{МАКС}} \leq 1. \quad (4)$$

Из результатов, приведенных в таблице, и неравенства (4) следует, что максимальное значение суммарной индуктивности $L_{AB\Sigma}$ составляет $3L_d$.

Вывод. Наибольшее значение индуктивности последовательно соединённых двух обмоток статора равно $3L_d$, а наименьшее значение – $3L_q$. Следовательно, если подключить прибор, измеряющий индуктивность, к двум последовательно соединённым обмоткам статора и медленно вращать вал СД, то можно определить положения вала, при которых измеряемая индуктивность имеет наибольшее и наименьшее значения. Разделив наибольшее значение индуктивности на 3, получим индуктивность обмоток статора по продольной оси. Разделив наименьшее значение индуктивности на 3, получим индуктивность обмоток статора по поперечной оси обмотки возбуждения.

Список использованной литературы

1. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в

Matlab 6.0: Учебн. Пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт. 2001. – 320 с.

3. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И. И. Трещев. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с.

4. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин / Н. Хэнкок. Пер. с англ. – М.: Энергия. 1967. – 224 с.



Войтенко
Владимир Андреевич,
канд. техн. наук, доц. каф.
ЭМС КУ Одеск. нац. поли-
техн. ун-та.
Тел. 048-7-348-467

Получено 18.05.2012

References

1. German-Galkin S. G. Matlab & Simulink. Planning of the mekhatronnykh systems on the personal COMPUTER / S. G. German-Galkin. – Sankt-Petersburg: CROWN of Eyelids, 2008. – 368 p. [in Russian].

2. German-Galkin S.G. Computer design of the semiconductor systems in Matlab 6.0: Train aid / S. G. German-Galkin. – Sankt Petersburg: CROWN of print, 2001. – 320 p. [in Russian].

3. Trestchev I. I. Electromechanics processes in the machines of alternating current / I. I. Trestchev. – Leningrad: Energy, 1980. – 344 p. [in Russian].

4. Hancock N. N. Matrix analysis of electrical machinery / N. N. Hancock. Translation from English one. – Moscow: Energy. 1967. – 224 p. [in Russian].