

ВЫСОКОТОЧНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ РЕДУКТОСИН

Н. Н. ЛЕВИН, А. Д. СЕРЕБРЯКОВ

Институт Транспорта и Связи, ул. Ломоносова, Рига, LV-1019, Латвия

Automātiskas sistēmas ieteikts izmantot reduktosinu ar ķemmveida zobu zonu. Tam ir vienkārša konstrukcija un nodrošina funkcionēšanas precizitāti līdz dažām leņķa sekundēm. Darbā noteikti šāda reduktosina optimālie parametri.

Для систем автоматики предлагается использовать редуктосин с гребенчатой зубовой зоной. Он имеет простую конструкцию и позволяет обеспечить точность функционирования до нескольких угловых секунд. В работе определяются оптимальные параметры такого редуктосина.

For automatic systems use of reductosyn with comblike toothed zone is proposed. It has simple construction and allows to provide the precision of functioning up to several angular seconds. The optimal parameters of such reductosyn are defined in the work.

Различные измерители угловых перемещений, например, в виде одно- и многополюсных вращающихся трансформаторов [1] или индукционных редуктосинов [2] находят широкое применение в различных системах автоматики. Хотя первые из названных устройств позволяют производить измерение углов с точностью до угловых минут, а вторые – с точностью до десятков угловых секунд, этого часто оказывается недостаточно, требуются измерители угловых перемещений более высокой точности. Одним из таких устройств повышенной точности и является рассматриваемый ниже индукционный редуктосин [3].

Конструктивная схема редуктосина приведена на Рисунке 1. Редуктосин содержит шихтованный из листов пермаллоя статор 1 с полюсными выступами 2-9, образующими между собой пазы 10, в которые уложены стороны катушек 11 обмотки возбуждения 12 ($r - r$) и выходных обмоток 13 ($A - X$) и 14 ($B - Y$), и шихтованный из листов пермаллоя ротор 15 с зубцами 16 на его поверхности, обращенной к статору. Шаг по зубцам ротора равномерный – t_z . С таким же шагом расположены зубцы 17 и на каждом полюсном выступе 2-9 статора 1. По ширине зубцы могут быть различными и иметь скос (на Рисунке 1 это не показано). Зубчатые поверхности статора и ротора покрыты диэлектриком, например, фторопластом или ротор – полиамидной пленкой, а статор – полиуретановой. Диэлектрик заполняет впадины 18 между зубцами статора и ротора, а на поверхностях зубцов, обращенных друг к другу, образует тонкую (0,004 ... 0,005 мм) пленку 19. Таким образом, внутренняя поверхность статора и внешняя – ротора оказываются цилиндрическими, гладкими, с небольшим трением (за счет введения смазки) с максимальным зазором 0,003 ... 0,005 мм при диаметре ротора 25 ... 30 мм.

Полюсные выступы статора расположены по окружности неравномерно. Шаг по зубцам смежных полюсных выступов, охватываемых катушками обмотки 12 возбуждения ($r - r$), равен

$$t_g = t_z(\kappa_g \pm 0,5), \quad (1)$$

где t_z – шаг по зубцам ротора; κ_g – любое, не равное нулю, целое число ($\kappa_g = 1; 2; 3; \dots$), выбираемое из условия обеспечения для размещения катушек обмотки возбуждения площади пазов. Чтобы выходные обмотки 13 и 14 находились по отношению друг к другу в квадратуре, необходимо, чтобы шаг по зубцам смежных полюсных выступов, охватываемых катушками этих обмоток, был равен

$$t_a = t_z(\kappa_a \pm 1/4), \quad (2)$$

где κ_a – любое, не равное нулю, целое число ($\kappa_a = 1; 2; 3; \dots$), выбираемое из условия обеспечения площади пазов, необходимой для размещения катушек выходных обмоток.

Представим магнитные проводимости немагнитных промежутков под полюсными выступами с учетом расположения их зубцов по отношению к зубцам ротора рядом Фурье в функции от углового поворота ротора α . В этом ряду ограничимся только первыми двумя членами, полагая, что выбором ширины зубцов статора и ротора, величины скоса этих зубцов и другими мерами [4], высшие гармонические составляющие проводимости сведены к ничтожно малой

величине или исключены вообще. С учетом значений $t_6(1)$ и $t_4(2)$ указанные магнитные проводимости могут быть записаны как

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= \lambda_5 = a_0 - a_1 \sin(\alpha Z_R); \\ \lambda_3 &= \lambda_8 = a_0 + a_1 \cos(\alpha Z_R); \\ \lambda_4 &= \lambda_7 = a_0 - a_1 \cos(\alpha Z_R); \\ \lambda_6 &= \lambda_9 = a_0 + a_1 \sin(\alpha Z_R),\end{aligned}\tag{3}$$

где a_0, a_1 – нулевая (постоянная) и первая гармонические составляющие разложения магнитных проводимостей полюсных выступов 2-9 в ряд Фурье; α – угол поворота ротора; Z_R – число зубцов ротора. Последнее может быть определено следующим образом:

$$Z_R = n_p(a-1) + 0,5n_p(\kappa_b \pm 0,5) + 0,5n_p(\kappa_a \pm 1/4),\tag{4}$$

где n_p – число полюсных выступов; a – число зубцов на полюсном выступе; κ_b и κ_a определены выражениями (1) и (2). В конструкции по Рисунку 1 выбрано: $\kappa_b = \kappa_a = 1$; $a = 2$; $n_p = 8$; знак “+”, поэтому $Z_R = 8(2-1) + 0,5 \cdot 8(1+0,5) + 0,5 \cdot 8(1+0,25) = 19$.

При включении обмотки возбуждения на синусоидальное напряжение всеми катушками этой обмотки возбуждается практически одинаковый по амплитуде магнитный поток каждой пары полюсных выступов, так как катушки включаются параллельно. Суммарный поток этих выступов определяется соотношением

$$\Phi = \frac{\dot{U}_B - \dot{I}_B Z_B}{\sqrt{2}\pi\omega_B f_B},\tag{5}$$

где \dot{U}_B – комплексное напряжение источника питания; \dot{I}_B, w_B – ток и число витков в катушке обмотки возбуждения; f_B – частота питающего напряжения; Z_B – полное сопротивление катушки обмотки возбуждения, обусловленное ее активным сопротивлением R_B и индуктивным сопротивлением X_B : $Z_B = R_B + jX_B$. В соответствии с Рисунком 1 катушки обмотки возбуждения охватывают соответственно полюсные выступы: первая катушка – 3 и 4, вторая – 5 и 6, третья – 7 и 8, четвертая – 9 и 2. Для каждого из этих полюсных выступов можно записать характер изменения амплитуды магнитного потока в функции угла поворота ротора следующим образом:

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= -\Phi \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_9} = -\Phi \frac{\lambda_2}{2a_0} = -\frac{\Phi}{2} \left[1 - \frac{a_1}{a_0} \sin(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_3 &= \Phi \frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4} = \Phi \frac{\lambda_3}{2a_0} = \frac{\Phi}{2} \left[1 + \frac{a_1}{a_0} \cos(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_4 &= \Phi \frac{\lambda_4}{\lambda_3 + \lambda_4} = \Phi \frac{\lambda_4}{2a_0} = \frac{\Phi}{2} \left[1 - \frac{a_1}{a_0} \cos(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_5 &= -\Phi \frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_6} = -\Phi \frac{\lambda_5}{2a_0} = -\frac{\Phi}{2} \left[1 - \frac{a_1}{a_0} \sin(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_6 &= -\Phi \frac{\lambda_6}{\lambda_5 + \lambda_6} = -\Phi \frac{\lambda_6}{2a_0} = -\frac{\Phi}{2} \left[1 + \frac{a_1}{a_0} \sin(\alpha Z_R) \right];\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\Phi_7 &= \Phi \frac{\lambda_7}{\lambda_7 + \lambda_8} = \Phi \frac{\lambda_7}{2a_0} = \frac{\Phi}{2} \left[1 - \frac{a_1}{a_0} \cos(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_8 &= \Phi \frac{\lambda_8}{\lambda_7 + \lambda_8} = \Phi \frac{\lambda_8}{2a_0} = \frac{\Phi}{2} \left[1 + \frac{a_1}{a_0} \cos(\alpha Z_R) \right]; \\ \Phi_9 &= -\Phi \frac{\lambda_9}{\lambda_9 + \lambda_2} = -\Phi \frac{\lambda_9}{2a_0} = -\frac{\Phi}{2} \left[1 + \frac{a_1}{a_0} \sin(\alpha Z_R) \right].\end{aligned}$$

Магнитные потоки $\Phi_2 - \Phi_9$ наводят в катушках выходных обмоток ЭДС. Используя значения потоков (6) и учитывая схему соединения катушек выходных обмоток (рис. 1), можно

записать выражения огибающих наводимых в этих обмотках электродвижущих сил в следующем виде:

а) для обмотки 13 (А – Х)

$$E_{cos} = 2\pi w_a f_B (\Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_6 - \Phi_7) = 2\sqrt{2}\pi w_a f_B \Phi \frac{a_1}{a_0} \cos(\alpha Z_R - 45^\circ); \quad (7)$$

б) для обмотки 14 (В – У)

$$E_{sin} = 2\pi w_a f_B (\Phi_4 + \Phi_5 - \Phi_8 - \Phi_9) = 2\sqrt{2}\pi w_a f_B \Phi \frac{a_1}{a_0} \sin(\alpha Z_R - 45^\circ), \quad (8)$$

где w_a – число витков в катушках выходных обмоток.

Измеренные значения напряжений на обмотках $U_{sin} \cong E_{sin}$ и $U_{cos} \cong E_{cos}$ позволяют определить угловое перемещение объекта. При этом точность воспроизведения синусной или косинусной зависимостей ЭДС от угла поворота увеличивается, если магнитный поток Φ будет неизменным, а отношение a_1/a_0 не будет зависеть от эксцентриситета ротора, обусловленного технологией изготовления.

Из выражения (5) следует, что магнитный поток Φ будет оставаться постоянным, если кроме приложенного напряжения и его частоты будет оставаться постоянной и величина тока I_B , потребляемого каждой катушкой обмотки возбуждения. Этот ток может быть определен как

$$I_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B}{R_B + jX_B} = \frac{\dot{U}_B}{R_B + j(X_{\gamma\delta} + X_\sigma)} = \frac{\dot{U}_B}{R_B + j2\pi f_B w_B^2 (\lambda_{\gamma\delta} + \lambda_\sigma)}, \quad (9)$$

где $X_{\gamma\delta}, \lambda_{\gamma\delta}$ – индуктивное сопротивление катушки и обуславливающая его проводимость двух полюсных выступов, охватываемых этой катушкой; X_σ, λ_σ – индуктивное сопротивление рассеяния и обуславливающая его проводимость потокам рассеяния (постоянная величина). Катушки обмотки возбуждения соединены параллельно, поэтому выражение (9) справедливо для любой из четырех катушек этой обмотки.

Рассмотрим, например, вторую катушку, охватывающую 5-й и 6-й полюсные выступы. Из выражения (9) следует, что постоянство величины тока I_B связано с постоянством эквивалентной магнитной проводимости двух полюсных выступов, в нашем случае $\lambda_{\gamma\delta} = \lambda_5 + \lambda_6$. Рассмотрим это равенство:

$$\begin{aligned} \lambda_5 + \lambda_6 &= [a_0 - a_1 \sin(\alpha Z_R)] + [a_0 - a_1 \sin(\alpha Z_R - \gamma)] = \\ &= 2a_0 - a_1 \{ \sin(\alpha Z_R) + \sin(\alpha Z_R - \gamma) \}, \end{aligned} \quad (10)$$

где γ – фазовый угол проводимости 6-го полюсного выступа относительно 5-го полюсного выступа.

Сумма проводимостей (10) будет постоянной величиной, если член выражения (10) в фигурных скобках будет равен нулю, то есть, если

$$\sin(\alpha Z_R) + \sin(\alpha Z_R - \gamma) = 0. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) имеет следующий вид:

$$\gamma = 180^\circ \pm 360^\circ K_B. \quad (12)$$

С другой стороны, фазовый угол, определяющий изменение проводимостей соседних полюсов, охватываемых катушкой обмотки возбуждения,

$$\gamma = \frac{360^\circ}{t_Z} t_B. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (12) и (13), можно получить, что

$$t_B = t_Z (K_B \pm 0,5),$$

то есть только при таком шаге t_B (1) обеспечивается постоянство тока I_B катушек обмотки возбуждения, и, следовательно, магнитного потока Φ каждой пары полюсных выступов, охватываемых катушкой обмотки. В этих условиях суммарные проводимости пар полюсных выступов, охватываемых катушками обмотки возбуждения, будут неизменными, не зависящими от угла поворота ротора. Действительно, с учетом (3)

$$\lambda_9 + \lambda_2 = \lambda_3 + \lambda_4 = \lambda_5 + \lambda_6 = \lambda_7 + \lambda_8 = 2a_0 = const.$$

При выполнении скользящими поверхностями статора и ротора можно добиться малой величины зазора и практического постоянства отношения a_1/a_2 при эксцентриситете, то есть

постоянства амплитуд магнитных потоков отдельных полюсных выступов при неравномерности величины немагнитного промежутка.

Покажем, что при малом немагнитном промежутке, например, $\Delta = 0,015$ мм, отношение a_1/a_2 будет практически постоянным. Известно [4], что для двух взаимно перемещающихся зубчатых элементов

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,5(\lambda_{max} + \lambda_{min}), \\ a_1 &= 0,5(\lambda_{max} - \lambda_{min}), \end{aligned} \quad (14)$$

где λ_{max} - максимальная проводимость немагнитного промежутка полюсного выступа, когда зубцы статора и ротора расположены друг против друга; λ_{min} - минимальная проводимость при расположении зубцов ротора против впадин статора.

Отношение

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} + \lambda_{min}} = \frac{1 - \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}}{1 + \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}} \quad (15)$$

не зависит от λ_{max} , когда $\lambda_{max} \gg \lambda_{min}$.

Предположим, что проводимость $\lambda_{min} \cong 2l\mu_0$ (здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха; l – осевая длина пакета), тогда

$$\lambda_{max} = \frac{b_z}{\Delta} l\mu_0 = \frac{3}{0,015} l\mu_0 = 200l\mu_0, \text{ где } b_z = 3 \text{ мм – ширина зубца. В этом случае отношение (15)}$$

$$\text{будет равно } \frac{a_1}{a_0} = \frac{1 - \frac{2}{200}}{1 + \frac{2}{200}} = 0,98.$$

Допустим, что за счет эксцентриситета немагнитный промежуток между зубцами уменьшился на 33 % и стал равным $\Delta' = 0,01$ мм; тогда λ_{min} по существу не изменится, а

$$\lambda_{max} = \frac{b_z}{\Delta'} l\mu_0 = \frac{3}{0,01} l\mu_0 = 300l\mu_0. \text{ В этих условиях отношение (15) } \frac{a_1}{a_0} = \frac{1 - \frac{2}{300}}{1 + \frac{2}{300}} = 0,987,$$

то есть изменится всего лишь на 0,7 %.

Таким образом, чем больше отношение $\lambda_{max}/\lambda_{min}$, а оно увеличивается при уменьшении немагнитного промежутка, тем в меньшей степени сказывается эксцентриситет на отношение a_1/a_0 . Величина ошибки в стабилизации потока $\Phi(5)$ и соответственно ЭДС (7; 8) будут зависеть от величины тока I_B (9) и сопротивления катушки обмотки возбуждения Z_B . Обычно отношение $I_B Z_B / U_B = 0,06 \dots 0,08$, но сведение толщины немагнитного промежутка к малой величине (порядка 0,015 мм) позволяет снизить это отношение до значения 0,002 ... 0,003, то есть обеспечить еще при меньшем диапазоне колебания тока I_B точность стабилизации магнитного потока Φ лучше 0,1 % в условиях максимально возможного эксцентриситета. При этом не исключаются и другие известные способы повышения точности редуктосина, например, путем повышения точности изготовления и устранения ошибок за счет увеличения числа полюсных выступов. В примере рассмотрен случай, когда число полюсных выступов $n_p = 8$ (Рисунок 1), а их может быть 16, 24, 32 при сохранении рассмотренных принципов конструктивной компоновки.

Таким образом, в рассмотренном редуктосине за счет его конструктивных особенностей может быть достигнуто повышение точности функционирования до нескольких угловых секунд без значительного усложнения технологии его изготовления.

Литература

- [1] Хрущев В. В. (1986) *Электрические машины систем автоматики*. Энергоатомиздат, Ленинград, 237 – 244
- [2] Ахметжанов А.А. (1986) *Высокоточные преобразователи угловых перемещений*. Энергоатомиздат, Москва, 7 – 26.
- [3] Белавин О.П., Булеков А.В., Левин Н.Н., Смирнов В.Д., Серебряков А.Д. (1990) Индукционный редуктосин. *АС 1584042, СССР, Бюл. Изобр. № 29*
- [4] Левин Н.Н., Серебряков А.Д. (1976) Электрические машины и приводы. Электропривод на базе двигателей со взаимно неподвижными обмотками. *Труды РВВККУ*, Вып. 3, Рига, 191.

Received on the 21st of November 1999