

1. *Иванов-Смоленский А.В.* Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. — М.: Энергия, 1969. — 304 с.

2. *Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В. и др.* Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 184 с.

3. *Лозенко В.В.* Математическая модель вентильного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов для исследования несимметричных и аварийных режимов работы // Межвед. сб. тр. МЭИ. — 1985. — № 67. — С. 29—39.

4. *Макаруч О.В., Ткачук В.І., Василів Р.К.* Магнітно-механічна характеристика явнополюсного вентильного двигуна з

постійними магнітами // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. — 2006. — № 3. — С. 29—33.

5. *Осідач Ю.В., Ткачук В.І., Макаруч О.В.* Особливості роботи її основні характеристики вентильного двигуна з зосередженими обмотками якоря // Вісн. ДУ "Львівська політехніка", 1998. — № 347. — С. 124—130.

6. *Jack A.G., Mecrow B.C., Haylock J.A.* A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motor for High-Performance Fault-Tolerant Applications // IEEE Trans. Ind. Applicat., Jul—Aug, 1996. — Vol. 32. — № 4. — Pp. 889—895.

Надійшла 20.02.2007

УДК 621.323.82

М.И.Ярославцев, канд.техн.наук (Черкасский ин-т пожарной безопасности, Черкассы)

Повышение точности регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя

Предложена схема линейного индукторного двигателя со скосом зубцов, которая, по сравнению с обычной схемой линейного индукторного двигателя, позволяет существенно повысить точность регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением.

Запропоновано схему лінійного індукторного двигуна зі скосом зубців, яка, в порівнянні зі звичайною схемою лінійного індукторного двигуна, дозволяє істотно підвищити точність регулювання тягового зусилля лінійного індукторного двигуна з частотно-струмовим керуванням.

Введение. В статье [2] была получена математическая модель одномодульного линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением, схема которого показана на рис. 1. Частотно-токовое управление двигателем сводится к запитке его обмоток токами, жестко связанными синусоидальной зависимостью с текущим положением подвижного элемента управляемого двигателя. При этом двигатель запитывается токами

$$i_a = i_0 \sin(2\pi x / \tau), \quad i_b = i_0 \cos(2\pi x / \tau), \quad (1)$$

где i_0 — амплитуда управляющих токов; τ — зубцовое деление двигателя; x — текущее положение подвижного элемента двигателя. Регулирование создаваемого тягового усилия осуществляется путем изменения амплитуды управляющих токов i_0 .

Двигатель создает тяговое усилие F

$$F = (\pi / \tau)(g_1 / g_0)E_0(\Phi - 0,25g_1E_0 \sin 4\varphi), \quad (2)$$

© Ярославцев М.И., 2007

где g_0, g_1 — постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей магнитных проводимостей воздушных зазоров под полюсами индук-

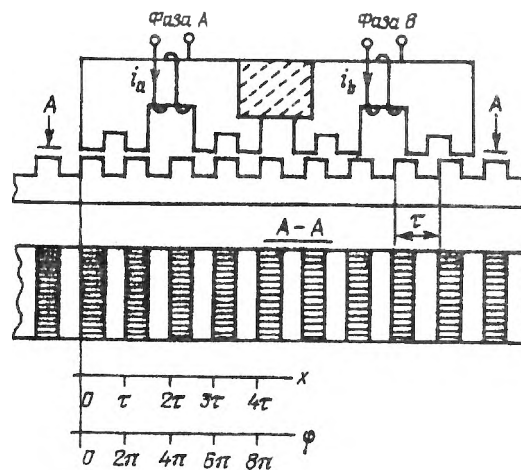


Рис. 1

тора двигателя; $E_0 = w i_0$ — амплитуда управляющих МДС, формируемых обмотками двигателя; w — количество витков в обмотках двигателя; Φ — магнитный поток возбуждения, создаваемый постоянным магнитом; φ — угол, определяющий текущее положение зубцов индуктора двигателя относительно зубцов рейки

$$\varphi = 2\pi x / \tau, \quad (3)$$

Создаваемое двигателем тяговое усилие (2) можно представить в виде суммы двух составляющих, т.е. $F = F_y + \Delta F$. Первая составляющая $F_y = (\pi/\tau)(g_1/g_0)\Phi E_0^2$ является регулируемой, т.е. полезной составляющей, пропорциональной амплитуде управляющих МДС E_0 , тогда как вторая составляющая $\Delta F = -(\pi/4\tau)(g_1^2/g_0)E_0^2 \sin 4\varphi$ является паразитной, снижающей точность регулирования тягового усилия. Паразитная составляющая является периодической функцией с периодом, равным четверти зубцового деления двигателя.

Точность регулирования тягового усилия описывает коэффициент

$$k = |\Delta F / F_y|_{\max} = g_1 E_0 / 4\Phi. \quad (4)$$

Чем меньше значение этого коэффициента, тем выше точность регулирования создаваемого тягового усилия.

Цель статьи — разработка принципа повышения точности регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением.

Воспользуемся подходом к повышению точности регулирования тягового усилия, предложенным в работе [3].

Выполним ферромагнитную рейку линейного индукторного двигателя в виде m достаточно узких, взаимно смещенных, равных по ширине продольных частей, как показано на рис. 2, где $\Delta\varphi$ — взаимное смещение крайних частей рейки в угловой форме. При равномерном продольном сме-

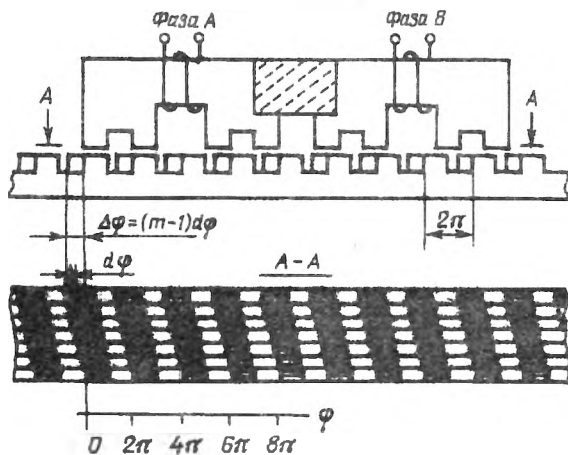


Рис. 2

щению частей рейки двигателя

$$\Delta\varphi = (m-1)d\varphi, \quad (5)$$

где $d\varphi$ — взаимное смещение соприкасающихся частей рейки в угловой форме.

Представим полученный двигатель, который для определенности назовем линейным индукторным двигателем со скосом зубцов, в виде m достаточно узких, жестко связанных секций с общими обмотками управления и магнитом возбуждения. Полагаем, что тяговое усилие двигателя со скосом зубцов равно сумме усилий, создаваемых его секциями в отдельности, т.е.

$$\tilde{F} = F_1 + F_2 + \dots + F_m = \sum_{i=1}^m F_i, \quad (6)$$

где F_i — усилие, создаваемое i -ой секцией двигателя, $i = 1, 2, \dots, m$.

Первая секция двигателя со скосом зубцов отличается от двигателя обычной конструкции (рис. 1) только шириной. Указанная особенность позволяет записать усилие, создаваемое первой секцией в таком виде:

$$F_1 = F_1(\varphi) = m^{-1} F(\varphi), \quad (7)$$

где $F(\varphi)$ — тяговое усилие, создаваемое двигателем обычной конструкции.

Последующие секции двигателя конструктивно одинаковые и отличаются от первой секции только начальным смещением индукторов относительно реек. Это позволяет выразить усилия этих секций двигателя через выражение усилия, создаваемого первой секцией.

На рис. 3 показана схема i -ой секции двигателя, где $\Delta\varphi_i = (i-1)d\varphi$ — начальное смещение индуктора секции относительно ее рейки. Поскольку i -ая секция двигателя конструктивно одинаковая с первой секцией и отличается только начальным смещением индуктора относительно рейки, то на основании этого и с учетом (7), создаваемое i -ой секцией усилие можно записать в таком виде:

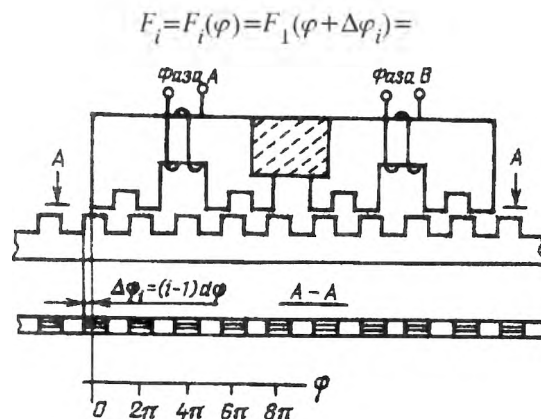


Рис. 3

$$=F_1[\varphi+(i-1)d\varphi]=m^{-1}F[\varphi+(i-1)d\varphi]. \quad (8)$$

Подставим полученный результат в выражение (6). С учетом (5) приходим к такому описанию тягового усилия, создаваемого двигателем со скосом зубцов

$$\begin{aligned} \tilde{F} &= m^{-1} \sum_{i=1}^m F[\varphi+(i-1)d\varphi] = \\ &= \frac{d\varphi}{\Delta\varphi+d\varphi} \sum_{i=1}^m F[\varphi+(i-1)d\varphi]. \end{aligned}$$

Теперь полагаем, что количество секций в двигателе $m \rightarrow \infty$, а взаимное смещение секций $d\varphi \rightarrow 0$. Выполнив переход от конечной суммы к интегралу с использованием формулы прямоугольников [1], приходим к такому результату:

$$\tilde{F} = \frac{1}{\Delta\varphi} \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} F(\xi) d\xi. \quad (9)$$

Согласно полученной формуле, тяговое усилие двигателя со скосом зубцов можно определить с использованием выражения тягового усилия двигателя обычной конструкции, т.е. без скоса зубцов. Для этого воспользуемся полученным в работе [2] выражением тягового усилия двигателя с произвольной формой управляющих МДС и получим

$$\begin{aligned} \tilde{F} &= \frac{\pi g_1}{\Delta\varphi \tau g_0} \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \left[\Phi \left(E_a \sin\xi + E_b \cos\xi \right) + \right. \\ &\quad \left. + (g_1/2) \left(E_a^2 - E_b^2 \right) \sin 2\xi \right] d\xi = \\ &= \frac{\pi g_1}{\tau g_0} \left\{ \Phi \frac{\sin\Delta\varphi/2}{\Delta\varphi/2} \left[E_a \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) + E_b \cos\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{g_1}{2} \left(E_a^2 - E_b^2 \right) \frac{\sin\Delta\varphi}{\Delta\varphi} \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

где E_a, E_b — управляющие МДС, формируемые обмотками двигателя.

Реализацию частотно-токового управления линейным индукторным двигателем со скосом зубцов сведем к формированию обмотками двигателя управляющих МДС

$$E_a = E_0 \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad E_b = E_0 \cos\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right). \quad (11)$$

Подставим эти выражения в (10) и после сложных преобразований приходим к окончательному результату

$$\tilde{F} = \frac{\pi}{\tau} \frac{g_1}{g_0} E_0 \left[\Phi \frac{\sin\Delta\varphi/2}{\Delta\varphi/2} - \frac{g_1}{4} E_0 \frac{\sin\Delta\varphi}{\Delta\varphi} \sin(4\varphi + 2\Delta\varphi) \right], \quad (12)$$

откуда следует, что создаваемое тяговое усилие существенно зависит от угла скоса зубцов $\Delta\varphi$.

Исследуем влияние скоса зубцов на создаваемое тяговое усилие. Представим тяговое усилие (12) в виде суммы регулируемой и паразитной составляющих, т.е. $\tilde{F} = \tilde{F}_y + \Delta\tilde{F}$

где

$$\tilde{F}_y = \frac{\pi}{\tau} \frac{g_1}{g_0} E_0 \Phi \frac{\sin\Delta\varphi/2}{\Delta\varphi/2}, \quad (13)$$

$$\Delta\tilde{F} = - \frac{\pi}{4\tau} \frac{g_1^2}{g_0} E_0^2 \frac{\sin\Delta\varphi}{\Delta\varphi} \sin(4\varphi + 2\Delta\varphi).$$

Введем в рассмотрение коэффициент $\tilde{k} = |\Delta\tilde{F}/\tilde{F}_y|_{\max}$, определяющий точность регулирования тягового усилия, создаваемого линейным индукторным двигателем со скосом зубцов. Чем меньше значение этого коэффициента, тем выше точность регулирования создаваемого тягового усилия.

Согласно (13) получим

$$\tilde{k} = g_1 E_0 k_{\Delta\varphi} / 4 \Phi = k \cdot k_{\Delta\varphi}, \quad (14)$$

где $k_{\Delta\varphi} = |\cos(\Delta\varphi/2)|$ — коэффициент, значение которого зависит от скоса зубцов.

Как видно, двигатель со скосом зубцов при условии $\Delta\varphi \rightarrow 0$ вырождается в двигатель обычной конструкции, а при $\Delta\varphi = \pi$ происходит полное исключение паразитной составляющей в создаваемом тяговом усилии.

Следует отметить, что подобного результата можно добиться также путем скоса зубцов не на рейке, а на индукторе двигателя.

Таким образом, в работе предложена схема линейного индукторного двигателя со скосом зубцов, которая, по сравнению с обычной схемой линейного индукторного двигателя, позволяет существенно повысить точность регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением.

1. Броунштейн И.Н., Семидяев К.А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1964. — 608 с.

2. Ярославцев М.И. Определение тягового усилия создаваемого линейным индукторным двигателем с частотно-токовым управлением // Праці ІЕД НАНУ. — 2006. — № 1. — С. 71—79.

3. Ас. 1778882 СССР, МКИ Н 02 К 41/03. Линейный индукторный двигатель / М.И.Ярославцев, И.М.Зильберг, Г.Д.Волков // БИ — 1992. — № 44.

Надійшла 14.11.2006