

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕПОЛНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Л.Я. Насибова, И.А. Розаев, Г.И. Однокопылов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

Современные тенденции развития полупроводниковой техники дали толчок в развитии давно известных систем электроприводов в новых сферах применения. Одним из таких электроприводов является вентильно-индукторный электропривод. На сегодняшний день он становится все более популярен благодаря простоте, высоким энергетическим показателям и большому диапазону регулирования. Такой электропривод благодаря особенностям конструкции и простоте реализации управления может найти применение во многих сферах промышленности, таких как военная, медицинская, космическая и другие, где предъявляются высокие требования по отказоустойчивости рабочего механизма.

Целью настоящей статьи является исследование вентильно-индукторного электропривода и формирование математической модели вентильно-индукторного электродвигателя для исследования его в неполнофазном режиме работы. В основу математической модели вентильно-индукторного двигателя положены уравнения электрических контуров, составленные для каждой из фаз. Приняты допущения, что магнитные системы каждой фазы идентичны друг другу, гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе не учитываются, а активные сопротивления фаз равны [1, 2].

На рис. 1 приведена схема замещения фазы.

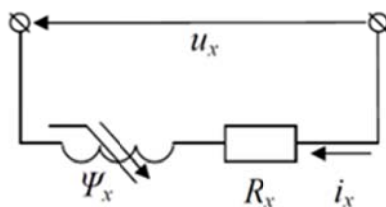


Рис. 1. Схема замещения фазы ВИД:

U_x – напряжение; i_x – ток; R_x – омическое сопротивление; Ψ_x – потокосцепление.

В этом случае каждая фаза ВИД описывается уравнением электромагнитного равновесия, согласно второму закону Кирхгофа. Уравнение электрического равновесия двигателя:

$$U_x = R_s i_x + \frac{d\Psi(\theta_{ex}, i_x)}{dt},$$

где U_x – напряжение, приложенное к обмотке фазы с индексом x ; i_x – фазный ток; R_s – электрическое сопротивление фазы; $\Psi(i_x, \theta_{ex}) = L_x(i_x, \theta_{ex}) i_x$ – потокосцепление фазы.

Известно, что индуктивность обмоток в вентильно-индукторном электродвигателе представляется нелинейной зависимостью текущего положения ротора и значения фазного тока, которая может быть представлена как:

$$L(i, \theta_e) = L_0(i) + L_1(i) \cos \theta_e + L_2(i) \cos 2\theta_e,$$

где $\theta_r = N_r \theta_e$ – механический угол положения ротора в радианах; N_r – число полюсов ротора; θ_e – электрический угол ротора в радианах; $L_0(i)$, $L_1(i)$, $L_2(i)$ – функции зависимостей индуктивности от тока основанные на трех основных положениях ротора в пространстве магнитного поля исходя из принципов закона Фарадея об ориентации ферромагнитных материалов в пространстве магнитного поля [3, 4].

$$\begin{aligned} L_0(i) &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \\ L_1(i) &= \frac{1}{2} [(L_a + L_u)] \\ L_2(i) &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right], \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $L_a = L(i, \theta_e = 0)$ – индуктивность при согласованном положении ротора и статора;

$L_m = L(i, \theta_e = \frac{\pi}{2})$ – индуктивность при промежуточном положении.

$L_u = L(i, \theta_e = \pi) = \text{const}$ – индуктивность при несогласованном положении ротора и статора [3,5].

Преобразуем уравнения электрического равновесия двигателя (1):

$$\begin{aligned} U_x &= R_s i_x + \frac{d\Psi(\theta_{ex}, i_x)}{dt} = R_s i_x + \frac{\partial \Psi(\theta_{ex}, i_x)}{\partial i_x} \frac{di_x}{dt} + \frac{\partial \Psi(\theta_{ex}, i_x)}{\partial \theta_{ex}} \frac{d\theta_{ex}}{dt} = \\ &= R_s i_x + L_{dx}(\theta_{ex}, i_x) \frac{di_x}{dt} + K_{ex} \cdot \omega, \end{aligned}$$

где $L_{dx}(\theta_{ex}, i_x) = \frac{\partial \Psi(\theta_{ex}, i_x)}{\partial i_x}$ – дифференциальная индуктивность;

$K_{ex} = \frac{\partial \Psi(\theta_{ex}, i_x)}{\partial \theta_{ex}}$ – конструктивный коэффициент,

противо-ЭДС – $e_x = K_{ex} \cdot \omega$;

$\omega = \frac{d\theta_{rx}}{dt}$ – угловая частота вращения ротора.

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора записывается как:

$$\Delta W_x = M_x \cdot \Delta \theta_r,$$

Где M_x – электромагнитный момент двигателя формируемый одной фазой;

W_x – механическая энергия [3].

Отсюда: $M_x = \frac{\Delta W_x}{\Delta \theta_r}$, с учетом принятых допущений принимаем момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту, тогда изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии $\Delta W'_f$ [5].

$$W'_f = \frac{1}{2} \cdot L_x(i_x, \theta_r),$$

отсюда:

$$M_x = \frac{\Delta W_x}{\Delta \theta_r} = \frac{\Delta W'_f}{\Delta \theta_r} = \frac{\partial L_x(i_x, \theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot \frac{i_x^2}{2}.$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов, формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями получим:

$$M_{\partial\theta} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \theta_r),$$

где $M_x(i_x, \theta_r)$ – момент, развиваемый фазой с индексом x ;
 m – число фаз двигателя.

Для описания вращательного движения ротора представим механическую часть в виде одномассовой системы [3],

где J – приведенный момент инерции ротора;

Обобщенная математическая модель трехфазного ВИД, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L_{dA}} \cdot (U_A - R_s i_A - K_{bA} \cdot \omega); \\ \quad L_{dA} = L_{dA}(i_A, \theta_e); \\ \quad K_{bA} = K_{bA}(i_A, \theta_e); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_{dB}} \cdot (U_B - R_s i_B - K_{bB} \cdot \omega); \\ \quad L_{dB} = L_{dB}(i_B, \theta_e); \\ \quad K_{bB} = K_{bB}(i_B, \theta_e); \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{L_{dC}} \cdot (U_C - R_s i_C - K_{bC} \cdot \omega); \\ \quad L_{dC} = L_{dC}(i_C, \theta_e); \\ \quad K_{bC} = K_{bC}(i_C, \theta_e); \\ M_{\partial\theta} = M_A(i_A, \theta_r) + M_B(i_B, \theta_r) + M_C(i_C, \theta_r) \\ \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega; \\ \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial\theta} - M_c. \end{array} \right.$$

Исходя из уравнений математической модели, можно заметить, что при отказе одной фазы, результирующий момент трехфазного двигателя уменьшается на 1/3. Однако благодаря независимости фаз друг с другом, отказ

фазы никоим образом не скажется на работе остальных фаз, и двигатель продолжит работу, правда с меньшим результирующим моментом.

Зависимости электромагнитного момента от числа работающих фаз приведены на рис. 2.

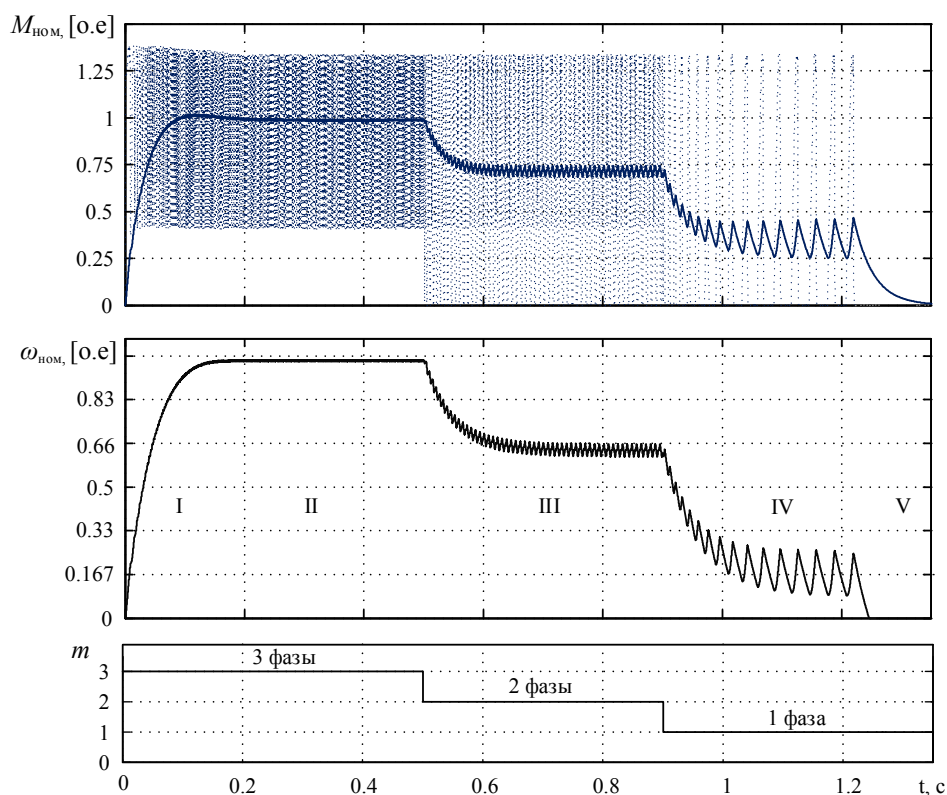


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента от числа работающих фаз

Как видно из рис. 2, обеспечивая поочередное отключение фаз вентильно-индукторного двигателя обеспечивается постепенное истощение резерва работы электродвигателя, по 1/3 мощности на каждую фазу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розаев И.А, Однокопылов Г.И, «Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы» // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 323 – №. 4. – С. 138–143.
2. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. «Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLabSimulink». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. – С. 411–414.
3. K.I. Hwu. Applying POWERSYS and SIMULINK to modeling Switched reluctance motor/ Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 429–438 (2009).
4. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2001. Т 1, pp. 143–169.