

*Истомина Н.Н., аспирант*

*Кременчугский государственный политехнический университет  
имени Михаила Остроградского*

*39600, г. Кременчуг, Полтавской обл., ул. Первомайская, 20*

*E-mail: [noriel-lomion@yandex.ru](mailto:noriel-lomion@yandex.ru)*

**Введение.** В настоящее время все большее распространение получает частотно-регулируемый привод. Благодаря его применению обеспечивается существенный энерго-, ресурсосберегающий и технико-экономический эффект [1], повышается производительность оборудования и качество продукции, улучшаются условия труда.

Одним из наиболее перспективных среди частотно-регулируемых приводов является вентильно-индукторный двигатель (ВИД). Его несомненные преимущества – простота изготовления, технологичность и относительно невысокая стоимость.

Также следует отметить следующие особенности ВИД:

- пассивный ротор, не несущий обмоток;
- независимость каждой фазы статора ВИД с точки зрения питания и расположения;
- выделение всех электрических потерь на катушках статора;
- пропитывание только катушек, а не всего статора;
- высокая ремонтпригодность, простота утилизации и разделение железа и меди;
- стоимость в производстве в три раза меньше, чем у машин с постоянными магнитами, и в два раза меньше, чем у асинхронных машин с короткозамкнутым ротором [1].

Все это выгодно выделяет этот тип двигателей среди остальных приводов переменного тока.

**Анализ предыдущих исследований.** Электромагнитные и электрические переходные и установившиеся процессы в вентильно-индукторном двигателе описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Структура уравнений определяется числом фаз двигателя, режимом работы вентильного коммутатора.

Индуктивности обмоток зависят от текущего положения ротора и значения тока, протекающего в обмотке. Фазные напряжения формируются в функции текущего положения ротора, при этом датчик положения ротора и электромеханический преобразователь являются одним конструктивным узлом [2].

Существующие наработки по математическому описанию вентильно-индукторных двигателей можно классифицировать по трем основным видам:

1. В системе координат, привязанной к фазам ВИД, с учетом зависимости индуктивностей фаз от положения ротора.

В этом случае [3] математическое описание процессов в ВИД представляется в виде трех подсистем уравнений, каждая из которых

описывает поведение определенной составной части вентильно-индукторного двигателя: уравнения идеального вентильного коммутатора, электромагнитной части двигателя, равновесия моментов на валу двигателя.

Уравнения электромагнитного равновесия двигателя в фазной системе координат выражаются по второму закону Кирхгофа:

$$U_e = \frac{dy_e}{dt} + R_e I_e. \quad (1)$$

2. Основанные на схемах замещения магнитной цепи, где индуктивности и взаимные индуктивности фаз являются функциями положения ротора, а также фазных токов.

Подобная модель для двухфазного ВИД представлена в [3], при этом энергия магнитного поля определяется как:

$$W = \frac{1}{2} i_A^2 L_A(\Theta, i_A, i_B) + \frac{1}{2} i_B^2 L_B(\Theta, i_B, i_A) + i_A i_B M(\Theta, i_A, i_B). \quad (2)$$

3. Основанные на представлении ротора машины эквивалентной обмоткой возбуждения.

Среди всех перечисленных типов моделей последний имеет структурно-топологическую привязку и не пресыщен математическими преобразованиями.

**Цель работы.** Проанализировать особенности векторного моделирования ВИД.

**Материалы и результаты исследований.** При составлении уравнений моделей ВИД использованы следующие допущения [3]:

- магнитная система двигателя является симметричной и линейной;
- питание вентильного коммутатора осуществляется от источника напряжения, который обладает двухсторонней проводимостью;
- транзисторы являются идеальными ключами;
- датчик положения ротора и система управления являются безинерционными звеньями и обеспечивают симметричность формируемых напряжений, приложенных к фазам обмотки двигателя.

Рассмотрим четырехфазный ВИД, схема которого представлена на рис. 1.

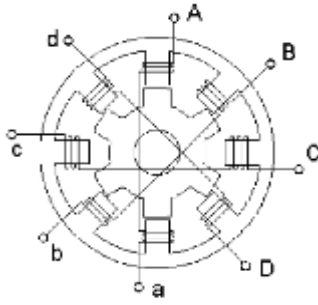


Рисунок 1 – Схематическое представление поперечного сечения четырехфазного ВИД

Для обеспечения последовательной подачи напряжения на фазы двигателя в зависимости от угла поворота ротора был смоделирован датчик положения, где  $\Theta_{omc}$  (в модели рис. 2 – Oots) – угол отсечки, определяется периодом одного цикла подключения фаз  $T_u$ .

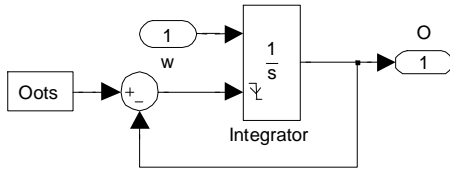


Рисунок 2 – Реализация датчика положения ротора в пакете Matlab

Угол отсечки находим как:

$$\Theta_{omc} = \frac{p}{T_u} = \frac{p}{6},$$

где  $T_u$  – период тактов,

$$T_u = \frac{k_m}{k_\phi} = \frac{24}{4} = 6;$$

$k_\phi$  – количество фаз двигателя;

$k_m$  – количество тактов,

$$k_m = \frac{n_s \cdot n_r}{|n_s - n_r|} = \frac{8 \cdot 6}{|8 - 6|} = 24;$$

$n_s$  – количество зубцов статора;

$n_r$  – количество зубцов ротора.

В этом случае каждая фаза ВИД описывается уравнением электромагнитного равновесия, согласно второму закону Кирхгофа. Ротор является магнитоактивным, поэтому наводимую в нем ЭДС можно представить эквивалентной обмоткой возбуждения (ЭОВ).

Наиболее удобной формой записи математического описания электрических машин является векторная.

Дифференциальные уравнения ВИД в векторной форме имеют вид [5]:

$$\begin{cases} \overline{U}_s = R_s \overline{i}_s + \frac{d\overline{\Psi}_s}{dt} + j \cdot \omega_{к.ВИД} \overline{\Psi}_s \\ \overline{U}_f = R_f \overline{i}_f + \frac{d\overline{\Psi}_f}{dt} + j \cdot (\omega_{к.ВИД} - \omega_{ВИД}) \overline{\Psi}_f \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\overline{U}_s$  – вектор напряжения статора;  $\overline{i}_s$  – вектор тока статора;  $\overline{\Psi}_s$  – вектор потокосцепления статора;  $\overline{U}_f$  – вектор напряжения эквивалентной обмотки возбуждения;  $\overline{i}_f$  – вектор тока ЭОВ;  $\overline{\Psi}_f$  – вектор потокосцепления ЭОВ;  $R_s, R_f$  – активные сопротивления статора и ЭОВ;  $\omega_{к.ВИД}$  – угловая скорость вращения координатных осей;  $\omega_{ВИД}$  – угловая скорость вращения ротора.

Электромагнитный момент ВИД определяется произведением двух обобщенных векторов потокосцепления и тока ЭОВ и статора соответственно:

$$M_{ВИД} = \frac{3}{2} p_n [\overline{Y}_f \times \overline{i}_s], \quad (4)$$

где  $p_n$  – количество пар полюсов.

Разложим систему уравнений (3) на проекции в ортогональной системе координат  $x, y$ , с произвольной скоростью вращения.

Для удобства совместим ось  $0x$  с реальной осью 1, а ось  $0y$  – с мнимой  $j$ . Тогда все вещественные проекции векторов на ортогональные координатные оси остаются положительными, а мнимые приобретают знак в зависимости от оси координатной системы для которой находится проекция:

$$j_y = 1, j_x = -1.$$

Тогда

$$U_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{dy_{sx}}{dt} - \omega_{к.ВИД} y_{sy},$$

$$U_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{dy_{sy}}{dt} + \omega_{к.ВИД} y_{sx},$$

$$U_{fx} = R_f i_{fx} + \frac{dy_{fx}}{dt} - (\omega_{к.ВИД} - \omega_{ВИД}) y_{fy}, \quad (5)$$

$$U_{fy} = R_f i_{fy} + \frac{dy_{fy}}{dt} + (\omega_{к.ВИД} - \omega_{ВИД}) y_{fx},$$

$$M_{ВИД} = \frac{3}{2} p_n [y_{fx} \overline{i}_{sy} - y_{fy} \overline{i}_{sx}].$$

Для описания механической части двигателя в эту систему добавляется уравнение движения:

$$\frac{d\omega_{ВИД}}{dt} = \frac{1}{J_{ВИД}} (M_{ВИД} - M_{с.ВИД}), \quad (6)$$

где  $J_{ВИД}$ ,  $M_{с.ВИД}$  – момент инерции и момент сопротивления двигателя.

Для решения необходимо уменьшить количество неизвестных в системе уравнений. Это можно сделать, переписав систему (5) относительно токов или потокосцеплений.

Векторы потокосцепления ВИД связаны с векторами токов зависимостями:

$$\begin{cases} \overline{\Psi}_s = L_s \overline{i}_s + L_{if} \overline{i}_f, \\ \overline{\Psi}_f = L_{if} \overline{i}_s + L_f \overline{i}_f, \end{cases} \quad (7)$$

где  $L_s$ ,  $L_f$  – индуктивности статора и ЭОВ;  
 $L_{if}$  – общая индуктивность фаз ВИД, в нашем  
 случае рассматривается четырехфазный двигатель,  
 поэтому:

$$L_{if} = L_{Af} + L_{Bf} + L_{Cf} + L_{Df}, \quad (8)$$

где  $L_{Af}$ ,  $L_{Bf}$ ,  $L_{Cf}$ ,  $L_{Df}$  – взаимные  
 индуктивности фазных обмоток и ЭОВ.

При разложении выражений (7) в ортогональной  
 координатной системе получим:

$$\begin{aligned} \psi_{sx} &= L_s i_{sx} + L_{if} i_{fx}, \\ \psi_{sy} &= L_s i_{sy} + L_{if} i_{fy}, \\ \psi_{fx} &= L_f i_{fx} + L_{if} i_{sx}, \\ \psi_{fy} &= L_f i_{fy} + L_{if} i_{sy}. \end{aligned} \quad (9)$$

Выразим из системы (9) токи через  
 потокоцепления:

$$\begin{aligned} i_{sx} &= A(\psi_{sx} L_f - \psi_{fx} L_{if}), \\ i_{fx} &= A(\psi_{fx} L_s - \psi_{sx} L_{if}), \\ i_{sy} &= A(\psi_{sy} L_f - \psi_{fy} L_{if}), \\ i_{fy} &= A(\psi_{fy} L_s - \psi_{sy} L_{if}), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $A$  – коэффициент, вводимый для упрощения  
 записи системы дифференциальных уравнений  
 ВИД:

$$A = \frac{1}{L_s \cdot L_f - L_{if}^2}. \quad (11)$$

После преобразований запишем систему  
 дифференциальных уравнений, описывающих  
 работу ВИД, относительно потокоцеплений:

$$\begin{cases} \frac{dy_{sx}}{dt} = U_{sx} - R_s A \cdot (y_{sx} L_f - y_{fx} L_{if}) + w_{к.ВИД} y_{sy} \\ \frac{dy_{sy}}{dt} = U_{sy} - R_s A \cdot (y_{sy} L_f - y_{fy} L_{if}) - w_{к.ВИД} y_{sx} \\ \frac{dy_{fx}}{dt} = U_{fx} - R_f A \cdot (y_{fx} L_s - y_{sx} L_{if}) + \\ + (w_{к.ВИД} - w_{ВИД}) y_{fy} \\ \frac{dy_{fy}}{dt} = U_{fy} - R_f A \cdot (y_{fy} L_s - y_{sy} L_{if}) - \\ - (w_{к.ВИД} - w_{ВИД}) y_{fx} \\ M_{ВИД} = \frac{3}{2} p_n \cdot A \cdot L_f [y_{fx} y_{sy} - y_{fy} y_{sx}] \\ \frac{dw_{ВИД}}{dt} = \frac{1}{J_{ВИД}} (M_{ВИД} - M_{с.ВИД}) \end{cases} \quad (12)$$

Решение приведенной системы уравнений было  
 получено с помощью пакета Matlab.

Для этого был спроектирован универсальный  
 блок, описывающий электромагнитный баланс в  
 отдельной проекции по каждой оси (рис. 3).

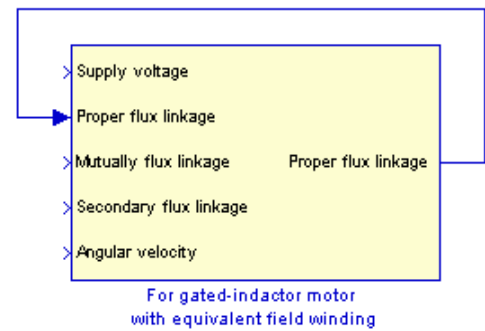


Рисунок 3 – Универсальный блок нахождения  
 потокоцеплений ВИД (внешний вид)

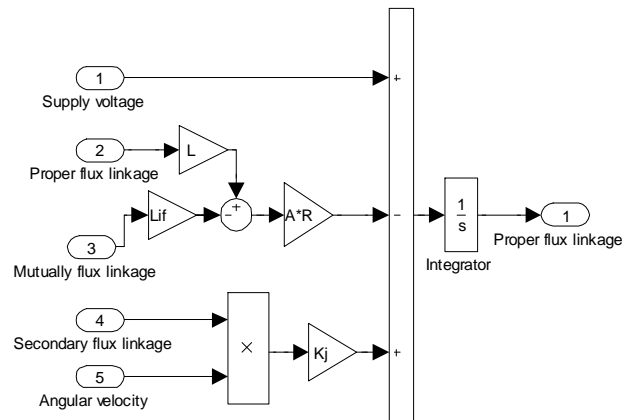


Рисунок 4 – Универсальный блок нахождения  
 потокоцеплений ВИД (внутренняя структура)

В приведенном блоке: supply voltage – проекция  
 питающего напряжения; proper flux linkage –  
 проекция собственного потокоцепления; mutually  
 flux linkage – проекция потокоцепления  
 взаимодействующего элемента модели; secondary  
 flux linkage – вторичная проекция собственного  
 потокоцепления; angular velocity – угловая  
 скорость вращения рассматриваемой системы (для  
 статора –  $w_{к.ВИД}$ , для ЭОВ –  $w_{к.ВИД} - w_{ВИД}$ ).

Разработанный блок содержит редактируемые  
 параметры, что позволяет использовать его для  
 всех уравнений электромагнитного баланса:

- Made-up coefficient,  $A$  – коэффициент;
- Proper resistance,  $R$  – собственное  
 сопротивление проекции элемента;
- Proper inductance,  $L$  – собственная  
 индуктивность проекции элемента;
- Mutually inductance,  $L_{if}$  – взаимная  
 индуктивность;
- Coefficient of velocity projection,  $K_j$  –  
 коэффициент проекции наводимой ЭДС может  
 принимать значения 1 и -1, в соответствии знакам в  
 системе уравнений (12).

Моделирование проводилось для ВИД  
 мощностью 110 кВт, с соотношением полюсов  
 статора/ротора – 8/6, при питании напряжением 380  
 В.

В ходе решения системы уравнений (12) были  
 получены результаты моделирования, при условии  
 пуска на холостом ходу с последующим набросом  
 нагрузки, представленные на рис. 5, 6.

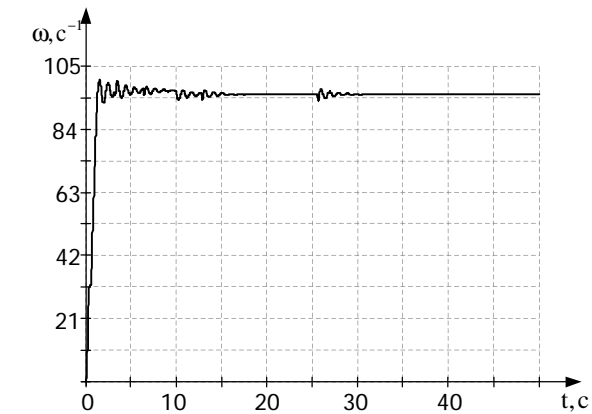


Рисунок 5 – Переходной процесс по скорости ВИД при набросе нагрузки

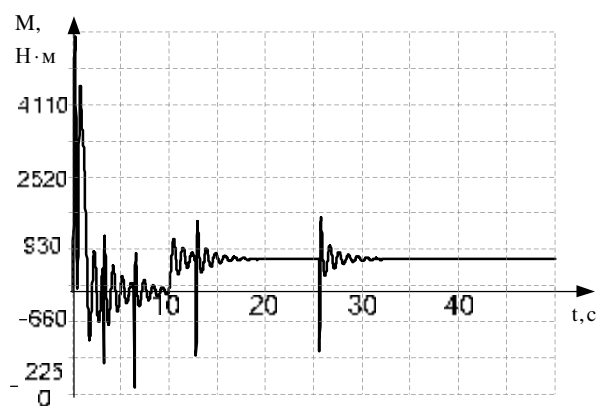


Рисунок 6 – Переходной процесс по электромагнитному моменту ВИД при набросе нагрузки

**Выводы.** Данная модель позволяет исследовать работу ВИД при различных внешних воздействиях, но при ее использовании следует учитывать, что

переходные процессы токов в статоре отличаются от реальных из-за принятого допущения о наличии ЭОВ. Разработанный универсальный блок нахождения потокосцеплений можно также использовать для создания ортогональных моделей АД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – перспективы развития // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков. – 2002. – т. 1 – С. 42–43.
2. Ткачук В. Электромеханотроніка. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». – 2006. – 440 с.
3. Голландцев Ю.А. Уравнения вентильного индукторно-реактивного двигателя при одиночной коммутации фаз // Научно-технический журнал «Электротехника». – М.: ЗАО «Знак». – 2003. – №7/03. – С. 45–51.
4. Малафеев С.И., Захаров А.В. Математическая модель двухфазного вентильного индукторного двигателя // Научно-технический журнал «Электротехника». – М.: ЗАО «Знак». – 2004. – №5/04. – С. 31–35.
5. Мещеряков В.Н., Петунин А.А. Структурно-топологический анализ моделей вентильного индукторного и асинхронного двигателей // Научно-технический журнал «Электротехника». – М.: ЗАО «Знак». – 2005. – №7/05. – С. 9–14.

Стаття надійшла 04.07.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.