

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Галайко Л.П., к.т.н., доц.

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ “ХПИ”, кафедра “Электрические машины”

тел. (0572) 47-31-77.

*В статті обґрунтовано доцільність розробки окремих моделей для сталих та перехідних режимів роботи вентильно-індукторних двигунів. Приведені блок-схеми для аналізу сталих режимів роботи двигунів в середовищі Simulink/Matlab. Розрахунки за допомогою розробленої моделі виконані для вентильно-індукторного двигуна рудничного електровозу потужністю 27 кВт та частотою обертів 1035 об/хвил.. Порівняно результати розрахунків на моделі та за допомогою програми на алгоритмічній мові Паскаль. Різниця результатів є в межах інженерної точності.*

*В статье приведено обоснование целесообразности разработки отдельных моделей для установившихся и для переходных режимов работы вентильно-индукторных двигателей. Приведены блок-схемы для анализа установившихся режимов работы двигателей в среде Simulink/Matlab. Расчеты с помощью разработанной модели проведены для двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт. Проведено сопоставление результатов расчета на модели и результатов расчета по программе на языке Паскаль. Различия результатов не выходит за пределы инженерной точности.*

Вентильные индукторные двигатели (ВИД) (в западной литературе Switched Reluctance Motors (SRM)) находят применение для широкорегулируемых приводов уже около 25 лет, однако до настоящего времени отсутствует единая общепризнанная методика расчета и исследования режимов работы этих машин. В последние годы некоторые исследователи для анализа работы ВИД применяют имитационное моделирование в среде Simulink/Matlab [1,2].

В работе [1] приведена универсальная модель ВИД в среде Simulink/Matlab с использованием SimPowerSystems-библиотеки энергетических элементов и элементов силовой электроники. Модель позволяет проводить совместные расчеты электромагнитных и электромеханических процессов в элементах системы с учетом коммутационных процессов в инверторе, драйвере, силовом преобразователе. По мнению авторов, модель ориентирована на оптимизацию конструктивных параметров ВИД и его алгоритмов управления. Однако, в работе не отображены в достаточной степени возможности модели для анализа установившихся и переходных процессов. Отсутствует сравнение результатов анализа, полученных на модели и с помощью других методов или из эксперимента.

В работе [2] приведена модель ВИД в среде Simulink/Matlab для анализа установившихся и переходных режимов работы без учета специфических явлений в диодах и ключевых элементах инвертора. Модель реализует расчетные соотношения, приведенные в работе [3]. Проведено сопоставление кривых фазных токов и момента для установившегося режима, полученных на модели и в эксперименте, которое подтвердило адекватность модели. При этом следует учесть, что при разработке модели были использованы экспериментальные зависимости потокосцепления  $\Psi$  от тока  $I$  и угла между полюсами статора и ротора  $\Theta$ - $\Psi(I, \Theta)$ .

В работе [2] высказана мысль: модель имеет практическую ценность только в том случае, если отражает лишь те свойства реальной системы, которые влияют на значение исследуемого показателя ее

эффективности. При этом нужно стремиться к тому, чтобы модель была как можно проще, а степень ее детализации правильно выбрана, что, безусловно, зависит от цели исследования. Отсюда делаем вывод, что если поставить цель исследовать параметры только установившегося режима, можно существенно упростить имитационную модель ВИД по сравнению с рассмотренными в работах [1,2].

Таким образом, целью статьи является представление имитационной модели ВИД только для установившихся режимов работы. Эта модель существенно проще рассмотренных в работах [1,2], так как в ней моделируются процессы только в одной фазе. Отсюда следует также, что модель может быть использована для анализа установившихся режимов работы ВИД с любым числом фаз и любым числом полюсов (изменяются только параметры блоков). И с этой точки зрения она является универсальной.

Модель основана на расчетных соотношениях и допущениях, приведенных в работе [4], где описана математическая модель ВИД для анализа установившихся режимов работы. Однако, имеются некоторые изменения и дополнения. В модели реализуются следующие соотношения:

$$\frac{d\Psi}{dt} = U_{\phi} - R \cdot i(\Psi, \Theta); \quad (1)$$

$$\Theta = \Theta_{\text{вкл}} - \Omega \cdot t \cdot 180 / \pi; \quad (2)$$

Здесь  $\Theta_{\text{вкл}}$  - угол между полюсами статора и ротора при включении транзисторов (угол  $\Theta$  принят равным нулю при согласованном положении полюсов);  $R$  - сопротивление фазы;  $\Omega$  - круговая частота вращения;  $t$  - время;  $U_{\phi}$  - напряжение питания фазы.

Напряжение питания фазы задается по следующему алгоритму:

если  $\Theta > \Theta_{\text{откл}}$ ,  $U_{\phi} = U$ , где  $U$  - напряжение источника питания; если  $\Theta < \Theta_{\text{откл}}$ ,  $U_{\phi} = -U$ . Здесь  $\Theta_{\text{откл}}$  - угол между полюсами статора и ротора, при котором происходит отключение транзисторов;

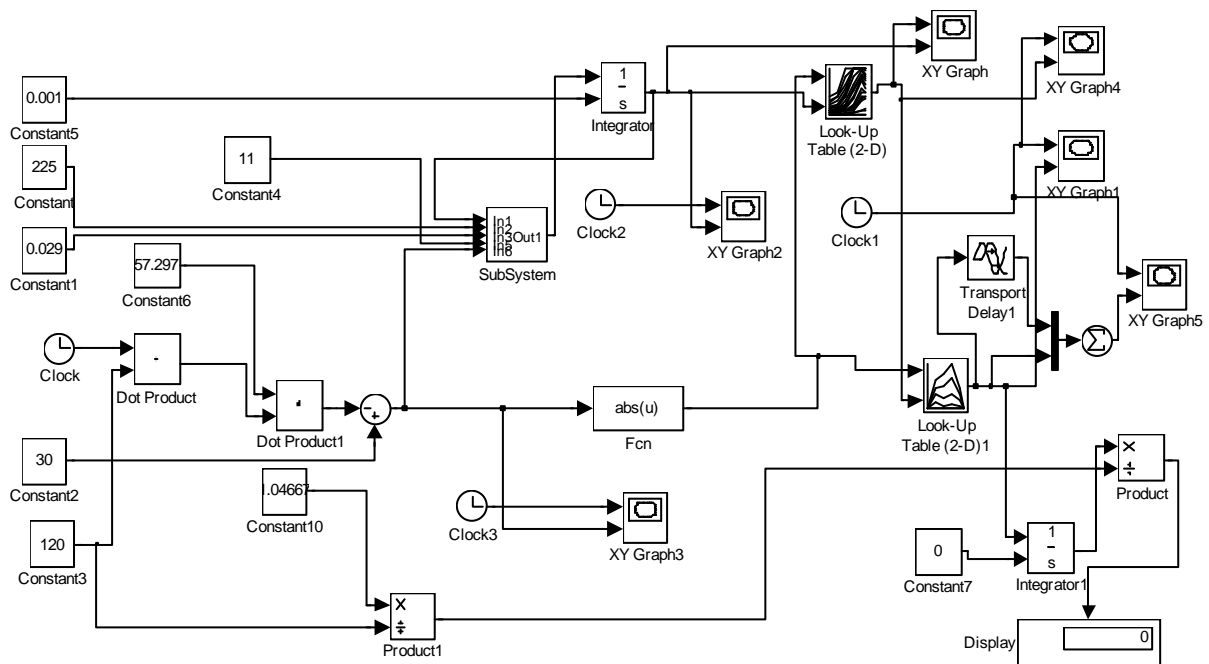


Рис. 1. Основная модель ВИД для установившихся режимов работы

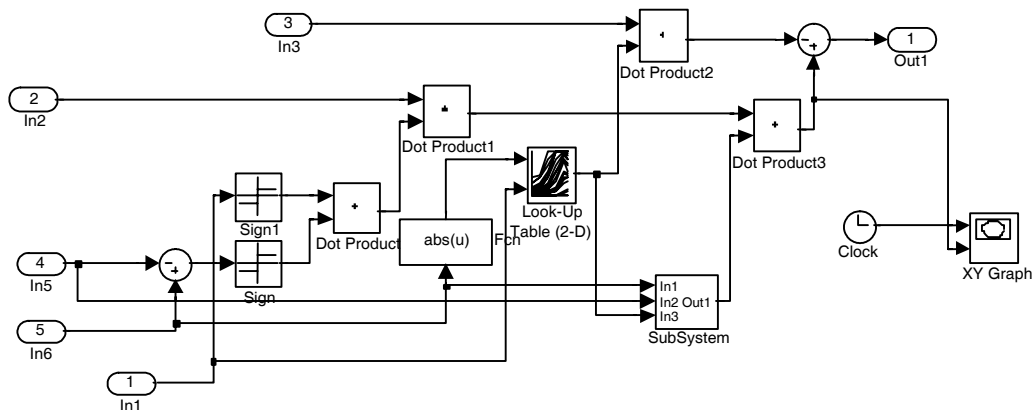


Рис. 2. Субмодель для вычисления правой части уравнения (1)

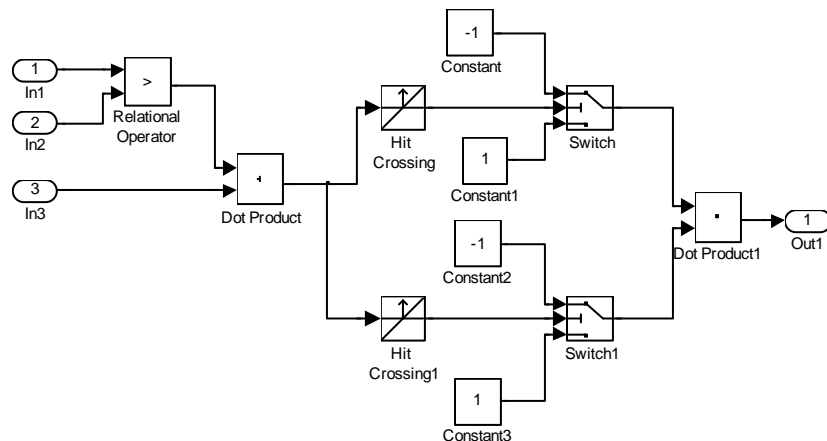


Рис. 3. Субмодель для учета ограничения тока фазы

при  $\Theta > \Theta_{откл}$  если  $i > i_{max}$ ,  $U_{\phi} = -U$ ; если  $i < i_{min}$ ,  $U_{\phi} = U$ . (это условие осуществляет ограничение тока фаз на основе принципа жесткой коммутации).

Исходные данные для расчета на модели: напряжение источника питания  $U$ ; углы включения и отключения  $\Theta_{вкл}$ ,  $\Theta_{откл}$ ; сопротивление фазы  $R$ ; угловая

частота вращения  $\Omega$ ; значения максимального и минимального токов  $i_{max}$ ,  $i_{min}$ ; величина периода фазы в радианах (необходима для расчета среднего значения момента за период); зависимости  $i(\Psi, \Theta)$ ; зависимости  $M(i, \Theta)$ . Здесь  $M$  - электромагнитный момент фазы.

Зависимости  $i(\Psi, \Theta)$  перестраиваются из магнитных характеристик  $\Psi(i)$  при разных  $\Theta$ . Магнитные характеристики могут быть получены одним из следующих способов:

- 1) путем расчета магнитного поля методом конечных элементов;
- 2) приближенным методом, описанным в работе [5];
- 3) из эксперимента, если расчет модели проводится для реального двигателя. Зависимость  $M(i, \Theta)$  рассчитывается с помощью магнитных характеристик по соотношениям

$$M = \frac{dW_{co}}{d\Theta} \Big|_{i=const}; W_{co} = \int_0^i \Psi \cdot di;$$

Модель предназначена для определения следующих параметров установившегося режима:

- среднего момента фазы  $M_{cp}$  и результирующего момента  $M_{рез} = M_{cp} \cdot m$ , где  $m$ - число фаз;
- максимального результирующего момента  $M_{max}$  и коэффициента пульсаций момента  $k_n = M_{max} / M_{рез}$ ;
- среднего, эффективного и максимального значения тока фазы;
- среднего и максимального значения результирующего тока.

С помощью этих параметров определяются механические характеристики при разных параметрах регулирования, осуществляется выбор элементов полупроводникового преобразователя и выбор параметров источника питания.

Основная модель представлена на рис.1. Она включает субмодель SubSistem, приведенную на рис.2 и предназначенную для вычисления правой части уравнения (1). В свою очередь, эта субмодель содержит другую субмодель, приведенную на рис.3, которая предназначена для реализации определения напряжения фазы с учетом ограничения величины тока фазы.

Исходные данные  $U, R, \Theta_{вкл}, \Theta_{откл}, \Omega$  и величина периода фазы задаются как параметры констант. Значения  $i_{max}, i_{min}$  заданы в качестве параметров в блоках Hit Crossing в субмодели на рис.3. Блоки Switch в этой субмодели настроены таким образом, чтобы передавать отрицательный сигнал при определении критических токов с помощью блоков Hit Crossing. Зависимости  $i(\Psi, \Theta)$  и  $M(i, \Theta)$ , приведены в качестве параметров в блоках Look-Up Table (2-D), которые осуществляют кусочно-линейную интерполяцию двумерного сигнала.

Блоки Sign на рис.2 изменяют знак напряжения при выполнении условия  $\Theta < \Theta_{откл}$  и останавливают работу модели при выполнении условия  $\Psi = 0$ . Проинтегрировав полученную зависимость  $M(t)$  и разделив результат интегрирования на значение периода фазы, получаем среднее значение момента фазы, которое выводим на дисплей. Подобным образом определяется среднее значение тока фазы (на рис.1 не показано).

Для определения максимального результирующего момента и коэффициента пульсаций используется блок Transport Delay, который задерживает величину сигнала момента на время, через которое проис-

ходит включение следующей фазы. Затем моменты двух фаз суммируются и результирующий момент выводится на экран. Максимальное значение момента определяется визуально из графика.

Для апробации модели были проведены расчеты для исходных данных, приведенных в работе [6]. Результаты расчета на модели и результаты из работы [6], полученные с помощью расчета по программе на языке Паскаль для математической модели из работы [4], приведены в таблице.

Таблица

U, В	$\Theta_{вкл}, \Theta_{откл},$ град	$\Omega,$ рад./с	$M_{cp}/k_n, Н/о.е.$	
			Simulink	Pascal
225	30, 11	120	240/1.25	222/1.28
		150	134/1.34	115/1.42
		170	102/1.45	84/1.46
	26,7	90	210/1.38	202/1.35
		100	163/1.62	153/1.62
		120	91.2/1.54	86.5/1.48
110	22,6	150	62/1.6	50.6/1.44
		50	192/1.33	194/1.39
	30, 11	60	175/1.48	168/1.58
		70	145/1.76	140/1.83
120	30, 11	100	71/1.55	54.4/1.47
		120	51/1.57	37.2/1.46

## ВЫВОД

Является целесообразным использование специальной имитационной модели для анализа установившихся режимов работы ВИД; Для улучшения качества модели необходимо совершенствовать интерполирование зависимостей  $i(\Psi, \Theta)$  и  $M(i, \Theta)$  путем создания более рациональных таблиц и использования сплайнов (с помощью собственного блока).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карпович О.Я., Онищенко О.А. Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя. // Электротехника и электромеханика, 2003, №4.
- [2] Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода. // Электричество, 2003, №3.
- [3] Бычков М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы. // Электричество, 1998, №6.
- [4] Галайко Л.П. Расчет зависимостей тока и момента вентильного индукторного двигателя различными методами. // Вестник НТУ "ХПИ", 2001, №17.
- [5] Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. Учеб. пособие. Издательство МЭИ., М., 2003.
- [6] Галайко Л.П. Механические характеристики вентильно-индукторного двигателя. // Вестник НТУ "ХПИ". 9'2002. №4.

Поступила 10.09.2004