

УДК 621.313

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ  
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ МАГНИТНЫХ  
ПОТЕРЬ***Галайко Л.П., к.т.н., доц.**Национальный технический университет "ХПИ", г. Харьков**61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21**E-mail: galaiko@kpi.kharkov.ua*

Розглядається імітаційна модель встановленого режиму роботи вентильно-індуктивного двигуна для програми SimuLink пакета програм MatLab, яка дозволяє визначити основні характеристики встановленого режиму, в тому числі й коефіцієнт корисної дії, завдяки чому в моделі субмоделі для розрахунку магнітних втрат, в основу якої закладений розрахунок вихрових струмів на різних ділянках магнітного ланцюга двигуна.

**Ключові слова:** магнітні втрати, вихрові струми, імітаційна модель, субмодель.

The simulation model of the set office hours SRM is examined for the program SimuLink package of programs of Matlab, which allows to define basic descriptions of the set mode, including output-input ratio, due to a presence in the model of submodel for the calculation of magnetic losses, in basis of which the calculation of eddy currents is fixed on the different areas of magnetic chain of engine.

**Keywords:** magnetic losses, eddy currents, simulation model, submodel.

**Введение.** Вентильно-индукторные двигатели (ВИД, на западе Switched Reluctance Motor-SRM) в последние годы находят все более широкое применение в регулируемом электроприводе благодаря таким его достоинствам как простота конструкции, малая стоимость, хорошие регулировочные свойства. Одной из причин, сдерживающих более быстрое распространение ВИД в различных областях промышленности, является отсутствие общепринятых апробированных методик для их проектирования.

Кроме того, в настоящее время большое значение имеет проблема повышения эффективности электромеханического преобразования энергии, то есть повышения КПД и уменьшения потерь. Для решения этой проблемы необходимо иметь достоверные эффективные методы расчета электрических и магнитных потерь. Разработке методики проектирования магнитных потерь в вентильно-индукторных двигателях не уделено достаточного внимания.

**Анализ предыдущих исследований.** Рассмотрим некоторые из последних работ, которые посвящены вопросам проектирования. В работе [1] приведена методика инженерного проектирования вентильно-индукторного двигателя, которая позволяет приближенно определить основные размеры двигателя. Аналогичная задача решается также в работе [2], где используется иной подход к решению задачи. В обеих работах поверочный расчет выполняется приближенно и без использования компьютерного моделирования. Кроме того, отсутствует описание методики расчета магнитных потерь. Вопросы создания методики расчета магнитных потерь посвящены работы [3, 4]. В работе [4]

описана математическая модель установившегося режима работы ВИД с учетом магнитных потерь и ее реализация в программе на языке Паскаль.

Современным методам исследования ВИД посвящены работы [5-7], в которых приведены модели для программы SimuLink пакета программ Matlab. В работе [5] использована приближенная билинейная модель для магнитных характеристик. Кроме того, в данной модели выход на установившийся режим возможен только через переходной процесс пуска. В работах [6, 7] используются реальные магнитные характеристики, определенные с помощью расчетов магнитного поля методом конечных элементов и пакета программ FEMM. Таблицы для магнитных характеристик введены в качестве параметров в блок двумерной кусочно-линейной интерполяции.

В работах [6, 7] разработаны отдельно модели для установившегося режима работы и для переходных режимов работы. Задачи, которые должны быть решены с помощью модели установившегося режима работы: определение формы тока, эффективного и максимального значения тока, определение максимального, среднего значения электромагнитного момента и коэффициента пульсаций момента, определение электрических, магнитных потерь и коэффициента полезного действия. Часть этих задач была решена в модели, приведенной в работе [6], другая часть была решена позже и результаты представлены в данной работе.

**Цель работы.** Разработка модели установившегося режима работы ВИД для программы SimuLink пакета программ MatLab, которая позволяет определить влияние на величину магнитных потерь величины напряжения питания  $U$ , углов включения  $\Theta_{in}$  и отключения  $\Theta_{off}$ , ШИМ напряжения и ШИМ

тока. Здесь  $\Theta_{in}, \Theta_{off}$  – углы между полюсами статора и ротора, при которых включаются и отключаются транзисторы, подающие напряжение питания на катушки фазы.

**Материал и результаты исследований.** За основу была принята модель установившегося режима работы ВИД, описанная в работе [6]. К основной модели были подключены субмодели для расчета магнитных потерь, а также блоки для расчета электрических потерь и коэффициента полезного действия.

Рассмотрим структуру субмодели для расчета магнитных потерь. Теоретические основы для создания этой субмодели приведены в работах [3, 4]. В этих работах при описании методики за основу был взят четырехфазный вентильно-индукторный двигатель. Магнитные потери в двигателе определяются как сумма магнитных потерь от вихревых токов на 6 участках: полюса статора, полюса ротора, трех участков ярма статора с разными законами изменения индукции и ярма ротора. При разработке методики были приняты допущения: пренебрегаем поверхностным эффектом для потока, магнитные поля на рассматриваемых участках принимаются однородными, влияние гистерезиса учитываем приближенно при определении удельной проводимости стали на участке.

Алгоритм для расчета магнитных потерь в полюсах статора может быть представлен следующими формулами:

$$J = \Omega \cdot \gamma / (W \cdot S) \cdot \frac{d\Psi}{dt};$$

$$J_{ef} = \sqrt{\int_0^T J^2 dt};$$

$$P_m = J_{ef}^2 \cdot d^2 / (12 \cdot \gamma \cdot \gamma_{st}) \cdot M;$$

где  $J$  – мгновенное значение плотности вихревых токов,  $J_{ef}$  – эффективное значение плотности вихревых токов,  $\Omega$  – круговая скорость вращения ротора,  $\gamma$  – удельная проводимость стали,  $W$  – число витков фазы,  $S$  – сечение полюса,  $\Psi$  – потокосцепление фазы,  $T$  – период изменения индукции в полюсах статора,  $\gamma_{st}$  – удельная масса стали,  $M$  – масса полюсов статора,  $d$  – толщина листов стали.

Приведенные выражения также используются для расчета магнитных потерь в сердечниках ротора после подстановки соответствующих значений  $S, M, T, \gamma$ . На участках ярма статора (ротора) в течение периода изменения индукции протекают потоки от разных полюсов статора (ротора) со сдвигом во времени и в разных направлениях. Для определения магнитных потерь на этих участках используем полученное значение плотности вихревых токов для одного полюса, корректируем его с учетом изменения параметров  $S, \gamma$ , затем сдвигаем полученный сигнал с учетом знака на время, за которое ротор повернется на 15 град (для четырехфазной машины), получаем результирующую кривую  $J(t)$

на периоде, рассчитываем для нее эффективное значение, по которому и определяем потери.

Описанный алгоритм реализован в разработанных субмоделях. Субмодель для расчета магнитных потерь (рис. 2) размещается в основной модели двигателя (рис. 1). Ее входы – значения потокосцепления фазы и круговой скорости ротора. Выход – значение суммарных магнитных потерь, вынесенное на дисплей. Внутри этой субмодели размещаются субмодели для расчета магнитных потерь в ярме статора (рис. 3) и для расчета магнитных потерь в ярме ротора (рис. 4). Входом для этих субмоделей является значение вихревого тока в полюсе статора, выходом – значения магнитных потерь на трех участках ярма статора и в ярме ротора. Для формирования зависимостей  $J(t)$  на разных участках ярма используются блоки *Transport Delay*, которые сдвигают сигнал вихревого тока очередного полюса статора на соответствующее время. Для интегрирования полученных зависимостей на периоде используются блоки *Relation Operator* и *Switch*.

Расчет с помощью разработанной модели проведен для вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт, частотой вращения 1147 об/мин, напряжением 220 В, спроектированного на базе серийного двигателя постоянного тока. Также был проведен расчет с помощью программы на языке Паскаль, в которой реализуется тот же алгоритм. Результаты расчета приведены в таблице.

**Таблица 1 – Результаты расчета магнитных потерь в двигателе рудничного электровоза двумя способами (нечетные варианты – на модели, четные – по программе)**

№ вар	$\Theta_{in}$ $\Theta_{off}$	$I_{max}$ $I_{min}$ , А	Магнитные потери на участках, Вт					
			а	б	в	г	д	е
1	30 11	320 300	72	59	137	79	11	71
2	30 11	320 300	88	77	92	64	8,9	72
3	30 12	320 300	68	56	129	70	9	65
4	30 12	320 300	83	73	87	56	6,4	66
5	30 12	120 100	64	53	114	54	7	54
6	30 12	120 100	67	58	70	40	6,5	52

В таблице приняты обозначения:  $I_{max}, I_{min}$  – максимальное и минимальное значение тока; а – сердечник статора; б – сердечник ротора; в, г, д – участки ярма статора; е – ярмо ротора.

По результатам расчета получены графики зависимостей  $J(t)$  для всех участков магнитной системы. На рис. 5 приведена зависимость  $J(t)$  для ярма ротора для 1 варианта, а на рис. 6 – для 5 варианта, в котором реализовано релейное прерывание тока.



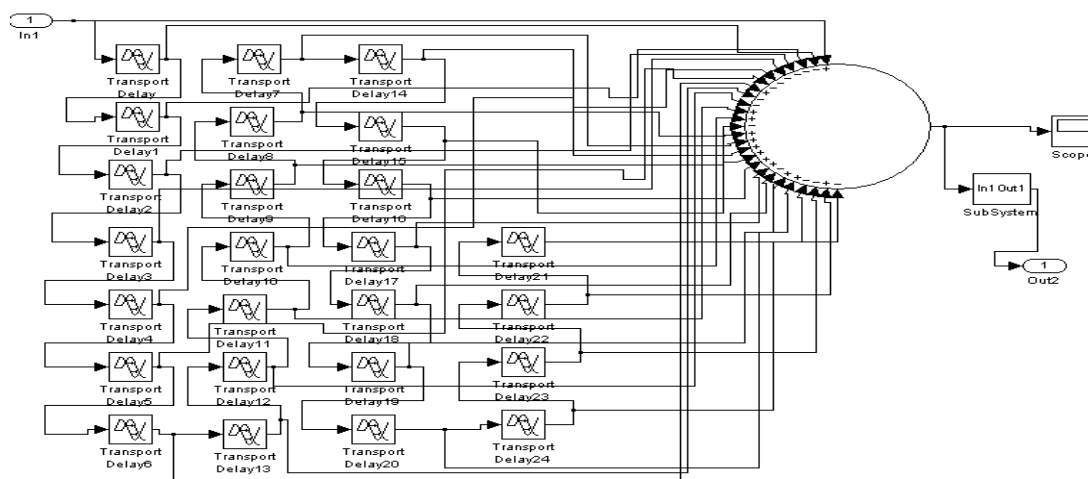


Рисунок 4 – Субмодель для расчета магнитных потерь в ярме ротора

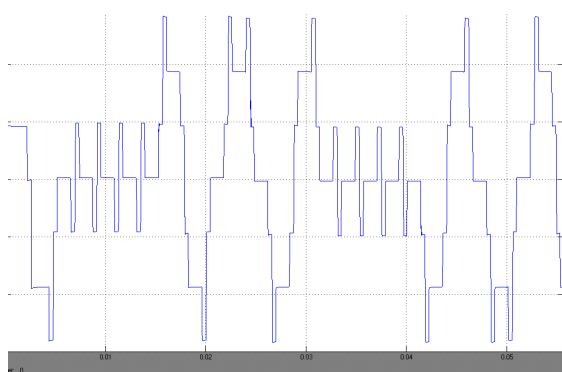


Рисунок 5 – График зависимости  $J=f(t)$  для ярма ротора для 1 варианта

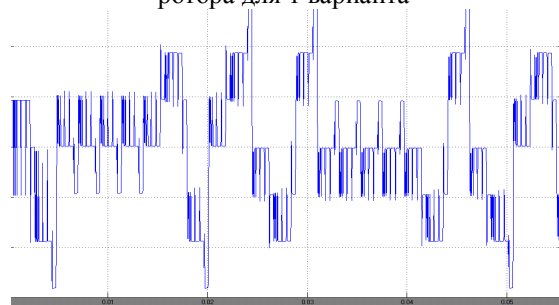


Рисунок 6 – Зависимость  $J=f(t)$  для ярма ротора для 5 варианта

**Выводы.** Анализ результатов расчета, приведенных в таблице, показал, что разработанная имитационная модель в целом адекватно отражает влияние параметров регулирования (фазового регулирования и релейного регулирования тока) на величину магнитных потерь. Предполагается проведение работы по совершенствованию модели в направлении увеличения точности, улучшения структуры и установления связи с основной программой Matlab с целью получения конечного результата расчетов в виде рабочих характеристик двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Инженерная методика проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя // Электричество. – 2007. - № 10. – С. 24-32.
2. Ильинский Н.Ф., Федоров А.Г., Бычкова. Е.В. Компьютерное проектирование вентильно-индукторных машин общепромышленного применения. // Труды МКЭЭЭ-2003. – Часть 1. – Крым. Алушта. – 2003. – С. 694-697.
3. Галайко Л.П. Учет магнитных потерь при проектировании вентильных индукторных двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2003. Вип 2.
4. Галайко Л.П. Математическая модель вентильно-индукторного двигателя с учетом магнитных потерь // Вестник НТУ «ХПИ». - 2003 (9), Т. 3. – С. 57-60.
5. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. - №3, - 2003. - С. 35-44.
6. Галайко Л.П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя // Электротехніка і електромеханіка. Харків - 2005, Вип. 2. С. 24-26.
7. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах // Вестник НТУ«ХПИ», 2005 (46). С. 24-27.

Стаття надійшла 26.03.2009 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Каліновим А.П.