

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Карпович О.Я., Онищенко О.А., к.т.н.

Одесская государственная академия холода

Украина, 65026, Одесса, ул. Дворянская, 1/3, ОГАХ, кафедра “Электротехники и электронных устройств”

тел. (0482) 20-91-71, e-mail: olekar@freemail.ru, olegoni@mail.ru

Наведені комп'ютерна модель для дослідження динамічних властивостей вентиляно-індукторного двигуна та результати експериментів з моделлю. Запропонована модель дозволяє проводити розрахунки електромагнітних та електромеханічних процесів в усіх елементах системи з урахуванням комутаційних особливостей силового інвертора, оцінювати механічні та динамічні характеристики двигуна, що проектується, розробляти стратегії управління ключами.

Приведены компьютерная модель для исследования динамических свойств вентиляно-индукторного двигателя и результаты экспериментов с моделью. Предложенная модель позволяет проводить расчеты электромагнитных и электромеханических процессов во всех элементах системы с учетом коммутационных особенностей силового инвертора, оценивать механические и динамические характеристики проектируемого двигателя, разрабатывать стратегии управления ключами.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) характеризуются сильным насыщением магнитопровода, что позволяет получить отличные удельные энергетические и массогабаритные показатели, близкие к лучшим образцам вентильных машин с высококоэрцитивными магнитами.

Несмотря на проработанность аналитических выражений, описывающих ВИД и всплеск исследований в этой области (проектирование машины, разработка моделей, способов управления и др.) до настоящего времени нет таких же надежных и достоверных моделей ВИД, как для асинхронных двигателей и машин постоянного тока. Следует учесть, что несинусоидальность потока и тока в фазах ВИД, а также наличие низкой взаимной магнитной связи фаз для большинства конструкций машин не позволяет использовать методологию обобщенной электрической машины, применять векторные диаграммы и другие классические методы анализа.

В настоящее время наиболее распространены численные и аналитические модели ВИД такого типа:

- линейные модели [1], для оценки статических и локальных режимов ВИД, не учитывающие насыщения магнитной системы двигателя и взаимного влияния фаз;

- «сверхбыстрые» модели [2], для оценки динамики машины, основанные на линейно-регрессионной аппроксимации нелинейных связей между моментом, током и положением ротора, использующие калибровочные кривые;

- нелинейные модели [3, 4], в которых зависимость потокосцепления от тока и угла поворота ротора описывается нелинейными кривыми, форма которых изменяется в зависимости от положения ротора и степени насыщения магнитной системы. Кривые описываются данными, получаемыми в результате полевых расчетов.

Перечисленные подходы имеют ряд очевидных недостатков, связанных с приближениями и допущениями для каждого из применяемых методов, зачас-

тую искажающие результаты моделирования.

Таким образом, следует считать, что создание компьютерной модели, позволяющей поверить аналитические исследования, оценить динамику и энергетические характеристики ВИД, согласовать момент нагрузки и диапазон изменения скорости, обеспечив при этом адекватность моделирования физическим процессам в двигателе – крайне важная, до конца еще не решенная задача. Реализация такой модели позволит заметно снизить стоимость и сроки разработки новой продукции машиностроения за счет исключения метода проб и ошибок, повторных испытаний, переконструирования.

Целью статьи является представление легко реализуемой и во многих случаях универсальной модели ВИД в среде Simulink/Matlab, с использованием SimPowerSystems – библиотеки энергетических элементов и элементов силовой электроники, в большой степени снимающей отмеченные выше проблемы и заметно дополняющей существующие нелинейные компьютерно-ориентированные модели.

Представляемый в статье подход построения модели позволяет с высокой точностью оценивать как механические и динамические характеристики проектируемого ВИД, так и пиковые напряжения на элементах его силовой части, токовые нагрузки, потери на переключение в силовых полупроводниковых элементах, создаваемые системой электромагнитные помехи, разрабатывать стратегии управления ключами.

Рассмотрим функциональную схему ВИД, приведенную на рис. 1. Двигатель конструкции 8/6 содержит четыре фазы L1...L4, силовой инвертор на основе схемы Миллера, состоящий из ключей VT и быстродействующих диодов VD, датчик положения ротора ДПР, силовой драйвер ключей и блок логического управления с узлом ограничения тока гистерезисного типа. Резистор R_s – датчик суммарного тока фаз ВИД. Драйвер ключей предназначен для формирования характеристик включения/выключения верхних (VT_H) и нижних (VT_L) транзисторов и предвари-

тельного усиления с гальванической развязкой сигнала обратной связи по току U_{Rs} .

Блок логики осуществляет стратегию симметричной коммутации фазами ВИД по сигналам датчика ДПР. Дополнительная задача блока – путем сравнения сигнала $U_{зт}$ задания тока двигателя и сигнала обратной связи по току $U_{от}$ осуществлять ограничение тока фаз на основе принципа «жесткой» коммутации P2/P0. При таком способе коммутации, энергия источника в режиме P2 идет на выполнение механической работы и накопление энергии магнитного поля фазы. В режиме P0 энергия, накопленная в магнитном поле, частично преобразуется в механическую энергию и частично на заряд конденсатора C_{ϕ} .

Модель, для приведенной функциональной схе-

мы ВИД, изображена на рис. 2. Опишем основные узлы, разработанные при построении модели.

Субблоки Source, TV, Bridge и C моделируют стандартными средствами SimPowerSystems работу трехфазной промышленной сети, трансформатора и мостового выпрямителя с конденсатором C_{ϕ} .

Субблоки SRM 1-3 и SRM 2-4 представляют собой виртуальную модель схемы Миллера с четырьмя фазами ВИД.

Внутреннее содержание субблоков SRM приведено на рис. 3.

С целью оценки всех динамических свойств схемы, модель инвертора учитывает работу MOSFET-ключей, обратных быстродействующих диодов и подсоединенных к ним снабберов (RLC-цепей).

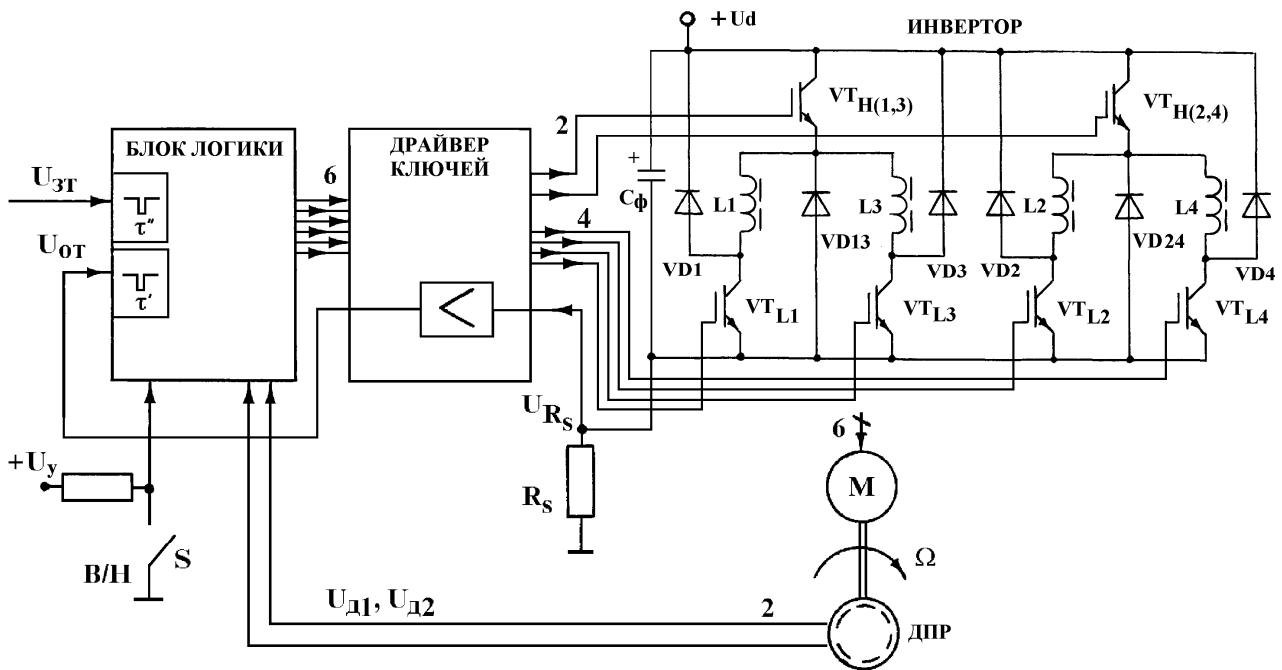


Рис. 1. Функциональная схема ВИД

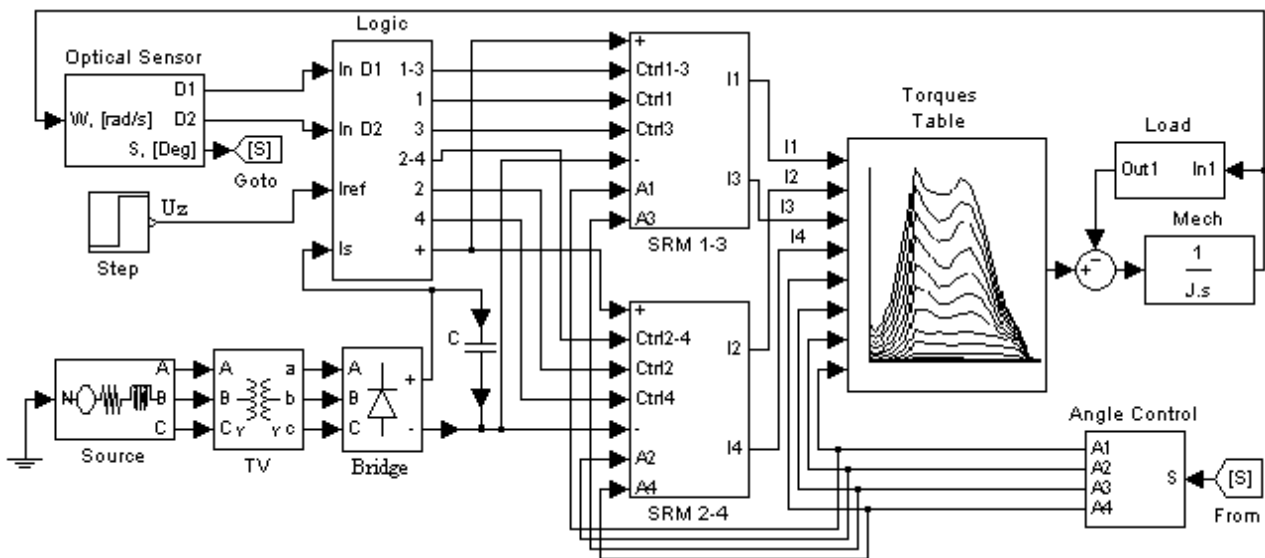


Рис. 2. Simulink-модель ВИД

В этих субблоках применены узлы управляемых индуктивностей фаз (drossel) с табличными данными ($L=f(i,s)$), полученными в результате полевых расчетов. Так решена задача связи значений токов и индуктивностей фаз с текущим положением ротора ВИД.

Средства Matlab позволили применить модули многомерных таблиц интерполяции Look-Up Tables типа 2-D. Эти модули резко облегчают расчеты между точками таблицы и, при необходимости, автоматически осуществляют многомерную экстраполяцию.

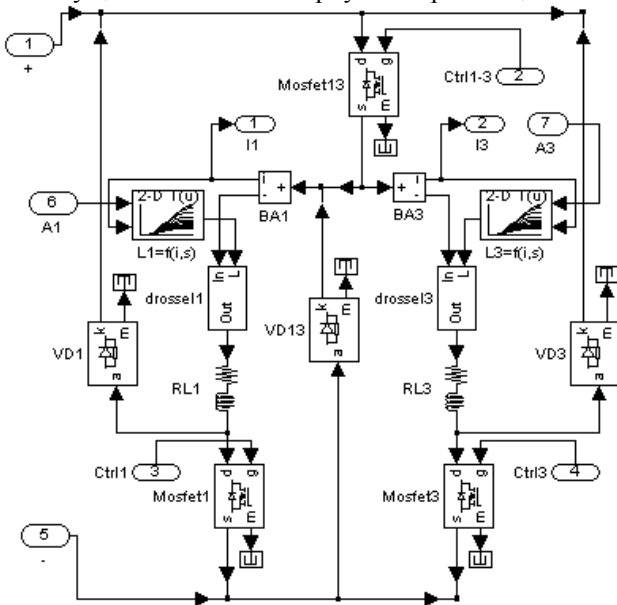


Рис. 3. Субблок SRM 1-3

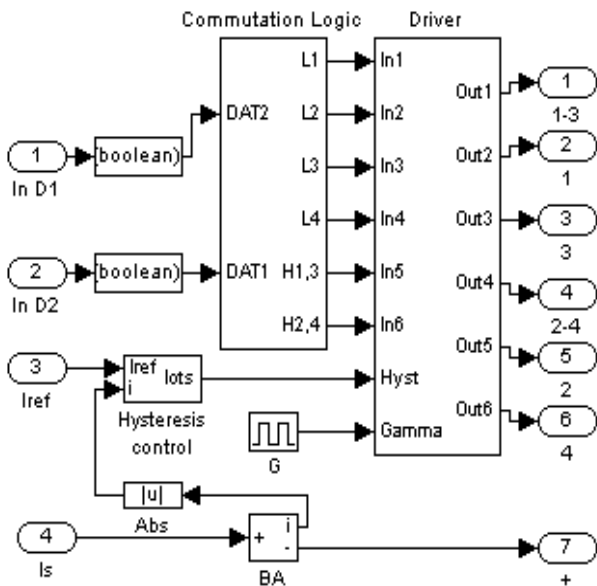


Рис. 4. Субблок Logic

Optical Sensor – субблок, генерирует прямоугольные сигналы, соответствующие текущему пространственному положению θ ротора. Этот субблок содержит интегратор со сбросом выходного сигнала через 360° и логические устройства, описывающие процессы формирования сигналов фотодатчиков.

Для согласования шестипульсной коммутации фаз двигателя за один оборот ротора с 30-ти градусными табличными данными служит субблок Angle

Control. На основе сформированных названным блоком сигналов осуществляется управление четырьмя 2-D таблицами изменения индуктивности фаз и четырьмя таблицами (Torques Table), связывающими суммарный электромагнитный момент и ток фаз в функции положения ротора.

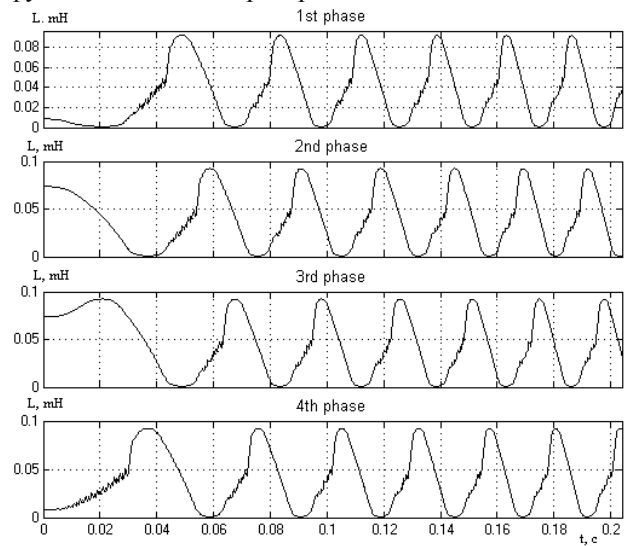


Рис. 5. Индуктивности 4-х фаз двигателя

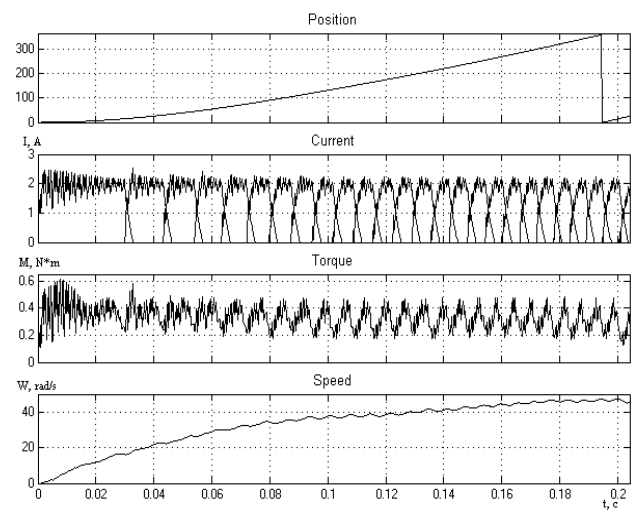


Рис. 6. Переходные процессы тока, момента и скорости за один оборот ротора двигателя

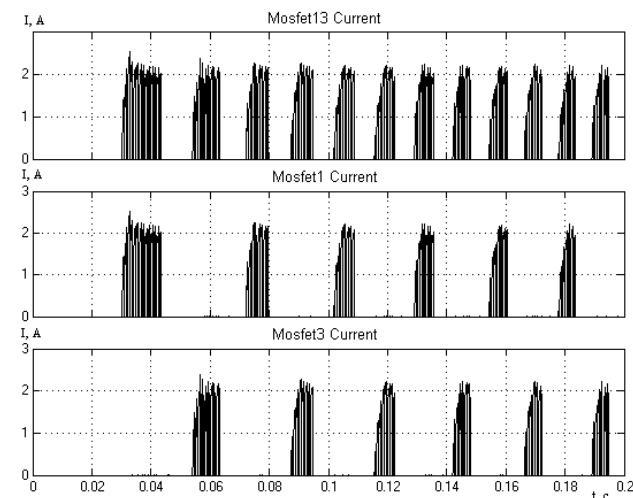


Рис. 7. Токи через транзисторы инвертора

Интегратор $1/J \cdot s$ и субблок Load моделируют уравнение движения одномассовой системы с нагрузкой типа «сухое трение».

В субблоке Logic (рис. 4) дополнительно применен генератор коротких импульсов G, осуществляющий кратковременный запрет открытия всех ключей, что вызвано необходимостью создания временной паузы для заряда бутстрепных конденсаторов драйверов верхних ключей.

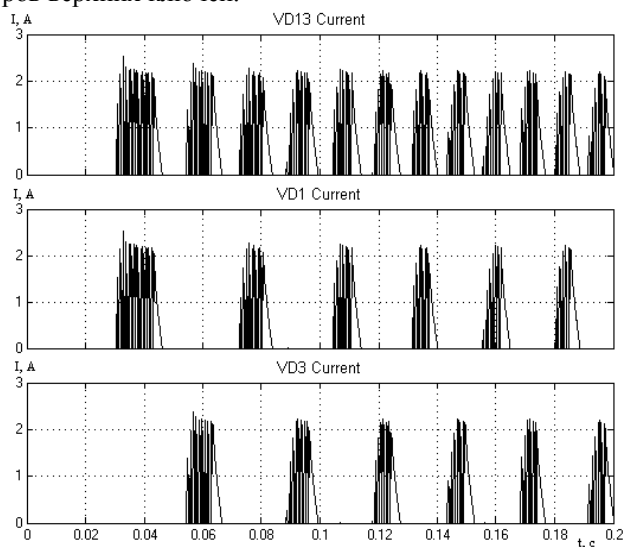


Рис. 8. Токи через диоды инвертора

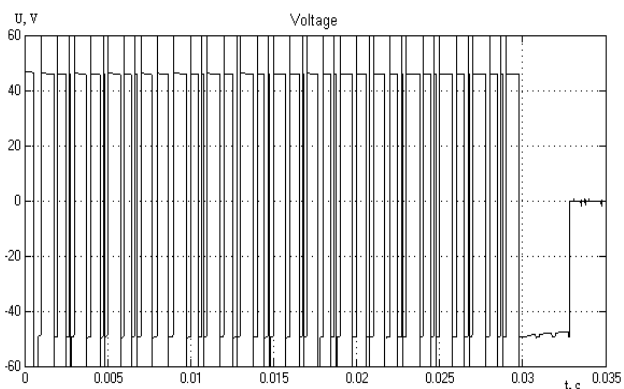


Рис. 9. Напряжение на рабочей фазе при пуске двигателя

Предложенный подход к созданию математической модели ВИД хорошо приближен к его реальной работе, так как учитывает насыщение магнитной системы двигателя, динамику цикла коммутации фаз, дискретность преобразования энергии и другие особенности работы рассматриваемой системы.

Например, субблок SRM реализован так, что моделируются все три интервала цикла переключения фаз ВИД: включение, рабочий интервал, интервал отключения. Первый интервал начинается при подключении фазы к источнику питания в рассогласованном состоянии зубцов статора и ротора, когда индуктивность фазы минимальна (рис. 5). На интервале включения электромагнитный момент не создается, поскольку не изменяется магнитная проводимость воздушного зазора между зубцами при изменении углового положения ротора. Интервал включения заканчивается в момент начала перекрытия зубцов фазы статора и ротора и служит для подготовки фазы к ра-

бочему интервалу. Рабочий интервал начинается с момента начала перекрытия зубцов фазы статора и ротора и заканчивается при их полном согласовании. Ток в обмотке двигателя и положительная производная магнитной проводимости по углу определяют появление электромагнитного вращающего момента (рис. 6). На этом интервале магнитная энергия преобразуется в механическую. Интервал отключения начинается с момента полного согласования зубцов фазы статора и ротора (значение индуктивности фазы максимально) и продолжается до полного прекращения протекания тока в фазной обмотке.

Описанные эффекты учитываются в модели, включая формирование траекторий высокочастотных переходных процессов от действия снабберов ключей и обратных диодов.

Графики, приведенные на рис. 5...9 представляют некоторые результаты компьютерных экспериментов с описанной моделью ВИД. Они сняты при статической нагрузке на валу двигателя $M_c=0,3$ Н·м, напряжении питания $U=48$ В, токе отсечки $I_{отс}=2$ А и частоте генератора G коротких импульсов $f=1000$ Гц (коэффициент заполнения сигнала $\gamma=0,8$). Кратковременные всплески напряжения (рис. 9) в момент переключения связаны не только с параметрами и работой снабберов, но и с особенностями процесса моделирования.

Разработанная средствами среды Simulink/Matlab компьютерная модель ВИД:

- обеспечивает достаточную точность моделирования и высокую сопоставимость реальным процессам, протекающим в ВИД;
- позволяет проводить совместные расчеты электромагнитных и электромеханических процессов в элементе системы с учетом коммутационных процессов в инверторе, драйвере, силовом преобразователе;
- позволяет путем незначительной доработки осуществлять исследования ВИД с любым другим соотношением чисел зубцов статора и ротора при алгоритме одиночной симметричной коммутации фаз;
- ориентирована на оптимизацию конструктивных параметров ВИД и его алгоритмов управления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Soares F., Costa Branco P.J. "Simulation of 6/4 Switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 37, No. 3, July 2001, pp. 989-1009.
- [2] Miller T.J.E., Glinka M., Cossar C., Gallegos-Lopez G., Ionel D., Olaru M. Ultra-fast model of the switched reluctance motor. IEEE-IAS Electric Machines Committee, St. Louis, USA, 12-16 October 1998, pp. 319-326.
- [3] Радимов И.Н., Рымша В.В, Малеваный О.Е. Моделирование режимов работы вентильно-индукторного двигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2002. - №2. – С. 60-64.
- [4] Nagel N.J., Lorenz R.D. Modeling of a Saturated Switched Reluctance Motor Using an Operating Point Analysis and the Unsaturated Torque Equation. Proc. Of IEEE, IAS Annual Conf., Oct. 3-7, 1999, pp. 2219-2226.

Поступила 28.08.2003