

УДК 681.51:621.316.79

О.Я. КАРПОВИЧ, асс., ОГАХ, Одесса

О.А. ОНИЩЕНКО, д-р. техн. наук, проф. ОГАХ, Одесса

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МИКРОКОМПРЕССОРА

Показаны особенности процесса верификации математических моделей (ММ) вентильно-индукторных электродвигателей (ВИД) микрокомпрессоров. Представлены результаты верификации ММ ВИД, разработанной в среде *Matlab*. Используются результаты полевого расчета и экспериментальные данные, полученные с помощью специализированного стенда.

Показані особливості процесу верифікації математичних моделей (ММ) вентильно-індукторних електродвигунів (ВІД) мікрокомпресорів. Представлені результати верифікації ММ ВІД, розробленої в середовищі *Matlab*. Використані результати польового розрахунку і експериментальні дані, отримані за допомогою спеціалізованого стенду.

The features of the verification process of switched-reluctance electric motors (SRM) mathematical models (MM) used for microcompressors are considered. The results of verification of the SRM MM developed in the *Matlab* environment are presented. The field calculation and experimental data obtained by means of specialized stand are used.

Введение. Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) – современный, весьма перспективный и быстро развивающийся тип электропривода [1, 2]. Например, применение управляемого ВИП в холодильных компрессорах позволяет существенно улучшить целый комплекс технико-эксплуатационных характеристик холодильных установок – повысить их холодильный коэффициент, $\cos \varphi$, снизить динамические нагрузки и массо-габаритные показатели [3, 4]. Массовому внедрению ВИП в компрессоростроение препятствует не только отсутствие апробированных методов проектирования основного элемента электропривода – вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) [5, 6], но и то, что до сегодняшнего дня не полностью решены задачи синтеза систем автоматического управления (САУ) ВИП по заданным критериям [7-10], нет однозначных решений по применению различных принципов моделирования ВИД, входящего в состав САУ ВИП [11-13].

Задача разработки математической модели (ММ) ВИД является одной из основных, возникающих при синтезе САУ ВИП, и, безусловно, результаты синтеза САУ ВИП напрямую зависят от адекватности процессов полученных при моделировании ВИД реальным процессам в двигателе.

Не останавливаясь на различных подходах, применяемых при моделировании ВИД (методы управляемой индуктивности, непосредственного представления зависимостей потокосцепления от пространственного положения

и тока ротора, обобщенной электрической машины) отметим, что в любом случае ММ ВИД должна быть верифицирована – результаты моделирования должны быть близки экспериментально полученным.

Основная сложность верификации ММ ВИД заключена в том, что по своему принципу работы ВИД не может функционировать без коммутатора, датчиков, регулятора [2, 3, 5], что приводит к многовариантности и резкому усложнению задач разработки ММ ВИД. К настоящему времени имеется достаточное количество решений [5-13], где приведены различная схемотехника и ММ ВИП с его элементами, а, например, в [14] даны результаты экспериментальной идентификации параметров ВИД, что позволяет перейти к решению актуальных задач верификации разработанных ММ ВИП. **Целью** статьи является представление методики верификации основных элементов ММ ВИД на основе имеющихся [14] экспериментальных данных, что создает предпосылки для синтеза высокоэффективных САУ ВИП микрокомпрессоров различного назначения.

Основной материал. В состав ММ ВИД [5-13] входит целый ряд его основных параметров, в частности, сопротивление фаз R , значения потокосцепления $\psi(\Theta)$ при различных углах поворота ротора Θ , статическая L_c и динамическая L_d индуктивности. Следует отметить, что мгновенное значение электромагнитного момента $M(\tau)$ ВИД может быть определено расчетом отношений приращения коэнергии $\Delta W_k(\tau)$ к бесконечно малому угловому перемещению ротора $\Delta\Theta(\tau)$, согласно известному выражению [3, 5]:

$$M(\tau) = \frac{dW_k(\tau)}{d\theta(\tau)} \approx \frac{\Delta \int \psi(\theta(\tau), i(\tau)) \cdot di(\tau)}{\Delta\theta(\tau)}. \quad \text{В это выражение входят значения}$$

потокосцепления $\psi(\Theta(\tau), i(\tau))$, зависящие от текущего углового положения ротора $\Theta(\tau)$ и тока фазы $i(\tau)$.

Значение сопротивления фазы R ВИД может быть определено экспериментально методом вольтметра-амперметра на постоянном токе. Для магнитной системы с переменным магнитным сопротивлением, к которой относится ВИД, идентифицировать величину потокосцепления также можно методом вольтметра-амперметра, но с помощью регулируемого источника напряжения переменной синусоидальной частоты f , зафиксировав ротор ВИД в требуемом i -м угловом положении. В этом случае, при фиксированном Θ_i ,

зависимость $\psi_i(I_{cpi})$ определяется из выражения $\psi_i(I_{cpi}) = \frac{I_{cpi} \cdot \sqrt{z_i^2 - R^2}}{2\pi \cdot f_i}$, где I_{cpi}

и f_i – среднее (за половину периода) значение тока и соответствующая частота; $z_i = U_{cpi} / I_{cpi}$ – полное сопротивление фазы ВИД на частоте f_i . Реализация метода осложнена тем, что в ходе экспериментов возможно значительное увеличение сопротивления фазы из-за нагрева и имеются технические сложности определения средних значений тока и напряжения на различных частотах.

Так, для одного экспериментального образца ВИД ($I_{max}=12,2$ А, $U_d=24$ В, $\psi_{max}=0,0143$ Вб) микрокомпрессора при частоте источника питания 50 Гц и согласованном, механически зафиксированном положении зубцов статора и

ротора, построены зависимости напряжения $u^*(\tau)$ и тока фазы $i^*(\tau)$ в относительных единицах (см. рис. 1). Из-за того, что ротор неподвижен и противо-ЭДС отсутствует, максимальному значению тока (1 о.е.=12,2 А) соответствует амплитудное значение напряжения 9,2 В. Из графиков, приведенных на рис. 1 понятно, что кривая потокосцепления обладает петлей гистерезиса, форма тока фазы ВИД несинусоидальна и, поскольку реальный источник напряжения имеет собственное внутреннее сопротивление, в том числе и индуктивного характера, форма напряжения на фазе ВИД также отличается от синусоидальной. Очевидно, что рассчитать мгновенные значения потокосцепления и построить зависимости $\psi_i(I_{срi})$ можно из выражения для электрического равновесия фазы, откуда получим:

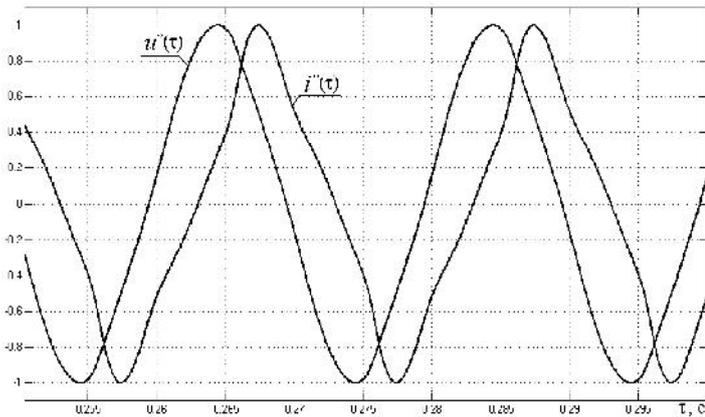


Рис.1 Относительные значения напряжения и тока фазы ВИД при использовании метода вольтметра-амперметра

$$\psi(\tau) = \int [u(\tau) - i(\tau) \cdot R] d\tau. \quad (1)$$

Следовательно, для расчета $\psi(\tau)$ в выражении (1) необходимо подставлять усредненные на некотором участке периода значения тока и напряжения, что требует применения не только специального оборудования, но и определенного программного обеспечения, либо использовать другие методы. Так, для идентификации основных параметров ВИД в [14] использован импульсный метод – разряд на фазу ВИД предварительно заряженного источником постоянного напряжения конденсатора большой емкости. В этом случае, конденсатор является практически идеальным источником переменной во времени ЭДС. В [14] идентифицированы указанные выше параметры экспериментального образца ВИД микрокомпрессора. Этот двигатель имеет соотношение полюсов статора к ротору 16/12, а его основные геометрические размеры и обмоточные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные размеры и обмоточные данные ВИД микрокомпрессора

Число фаз	4
Наружный диаметр статора, мм	130
Диаметр ротора, мм	80,5
Воздушный зазор, мм	0,25
Длина пакета статора, мм	80
Число витков катушки фазы	33
Сопротивление фазы (при 20 °С), Ом	0,525

Зависимости потокосцепления (индуктивности) от тока и углового положения ротора рассчитаны с помощью среды FEMM специалистами [15].

Эти зависимости, в том числе для согласованного и рассогласованного положений зубцов статора и ротора, аппроксимированы по методике [16] и с их помощью построена ММ импульсного устройства идентификации [14], приведенная на рис. 2.

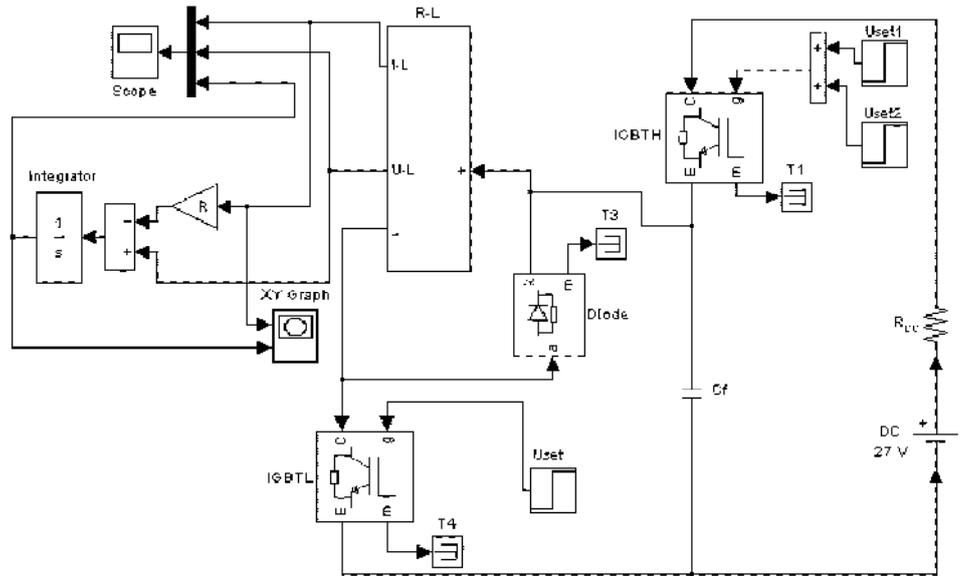


Рис.2 Модель импульсного устройства идентификации параметров ВИД микрокомпрессора

В состав разработанной модели входит ее основной элемент – ММ фазы ВИД (рис.3).

Динамические режимы разряда конденсатора, полученные при моделировании для согласованного и рассогласованного положений зубцов статора и ротора ВИД, а также соответствующие им статические зависимости потокосцепления в функции тока приведены на рис. 4 и рис. 5.

Техническая реализация импульсного устройства идентификации приведена в [14]. С помощью этого устройства искомые параметры получены

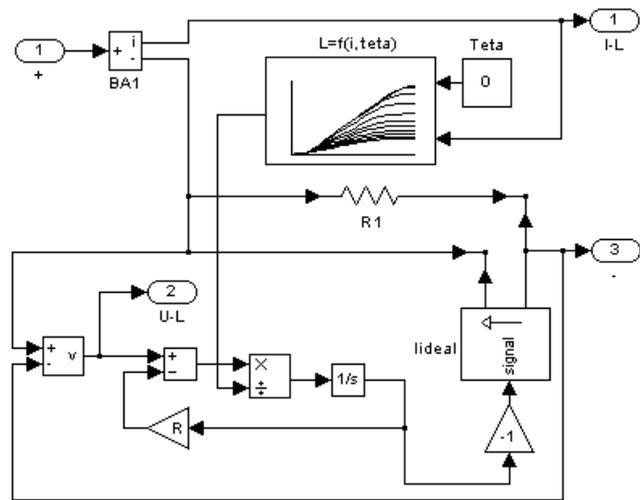


Рис. 3 Математическая модель фазы ВИД (см. рис. 2, R-L субблок)

измерением напряжения $u(\tau)$, приложенного к фазе ВИД, а также измерением падения напряжения на токоизмерительном резисторе R_s , которое пропорционально току фазы $i(\tau)$ двигателя.

Измерения проведены при неподвижном роторе, для двух характерных его положений относительно статора: согласованном (оси полюсов возбуждаемой фазы статора и оси полюсов ротора совпадают) и полностью рассогласованном (оси полюсов возбуждаемой фазы статора находятся посередине между осями полюсов ротора). Потокосцепление фазы ψ из уравнения электрического равновесия $\frac{d\psi}{d\tau} = u(\tau) - R \cdot i(\tau)$, получено интегрированием (1) при начальном условии $\psi_{(\tau=0)}=0$.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости $\psi = f(i)$ и зависимости, полученные при моделировании магнитного поля в среде *FEMM* [17], демонстрирующие достаточно высокую их сходимость.

Обработка результатов эксперимента выполнена методом Эйлера с фиксированным шагом по времени Δt . Потокосцепление на n -ом шаге интегрирования: $\psi_n = \psi_{n-1} + \Delta\psi_n$, где ψ_{n-1} – потокосцепление, рассчитанное на $n-1$ шаге; $\Delta\psi_n = (u_n - R \cdot i_n) \cdot \Delta t$ – приращение потокосцепления на n -ом шаге расчета. Осциллограммы, для указанных положений ротора относительно статора, после масштабирования, представлены на рис. 6, где также приведены значения изменения потокосцепления фазы обмотки статора, полученные численным интегрированием с использованием экспериментальных значений напряжения и тока.

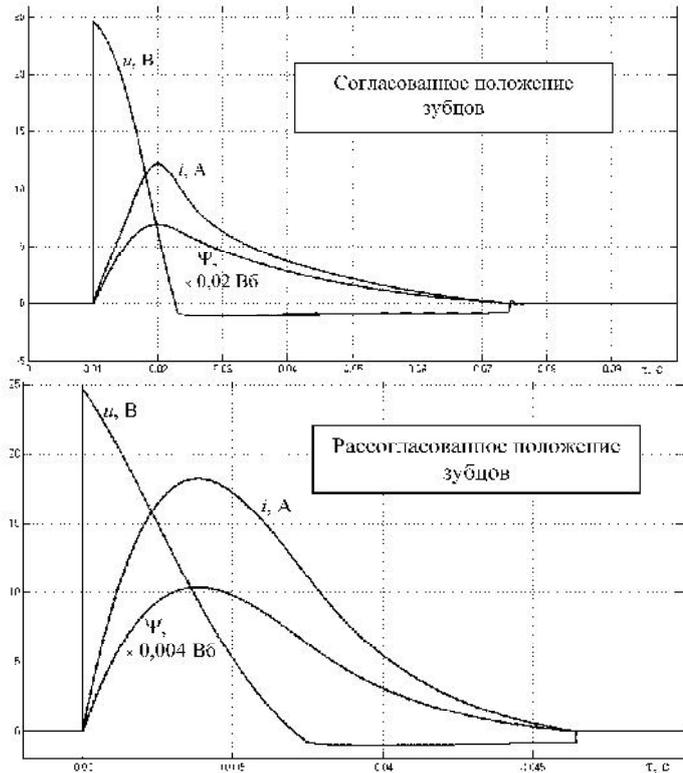


Рис. 4 Результаты моделирования

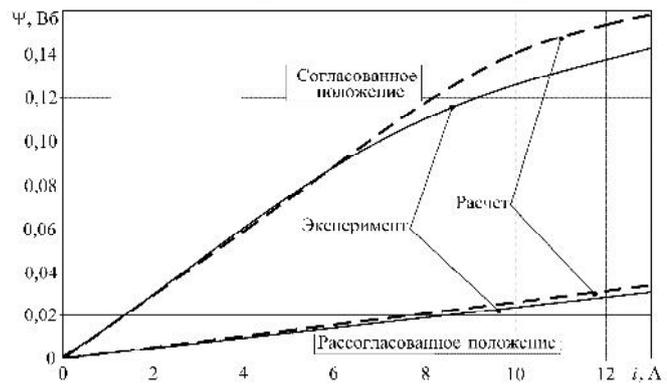


Рис. 5 Сравнение экспериментальных и расчетных (*FEMM*, [14, 17]) зависимостей $\psi = f(i)$

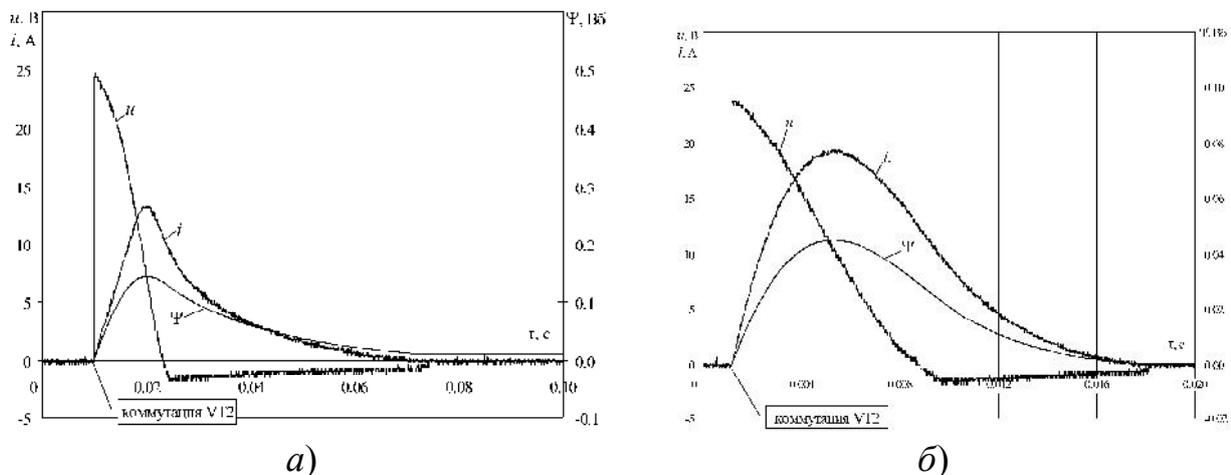


Рис. 6 Экспериментальные процессы [14] изменения во времени напряжения, тока и потокосцепления при разряде конденсатора на фазу ВИД: а) согласованное положение зубцов; б) рассогласованное положение зубцов

Таким образом, разработанные средствами среды *Matlab/Simulink* и верифицированные методами натуральных экспериментов имитационные модели ВИД:

– обеспечивают достаточную для решения практических задач синтеза САУ ВИП микрокомпрессоров точность моделирования и высокую сопоставимость реальным процессам, протекающим в их ВИД;

– позволяют проводить совместные расчеты электромагнитных и электромеханических процессов во всех элементах системы управления с учетом коммутационных процессов в инверторе, драйвере, силовом преобразователе.

Список литературы: 1. *Захаров А.А.* Перспективы внедрения вентильно-индукторного электропривода / А.А. Захаров // *Конструктор. Машиностроитель.* – 2008. – №5. – С. 6-9. 2. *Бычков М.Г.* Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития / М.Г. Бычков // *Рынок Электротехники.* - 2007. – №2. – С. 23-28. 3. *Кузнецов В.А.* Вентильно-индукторные двигатели. Учебное пособие / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 57 с. 4. *Онищенко О.А.* Система управления электроприводом поршневого компрессора холодильной установки / О.А. Онищенко // *Электромашиностроение та електрообладнання.* – 2005. – №65. – С. 23-28. 5. *Krishnan R.* Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p. 6. *Ткачук В.И.* Электромехатроніка: Навч. посібн. / В.И. Ткачук. – Львів: Львівська політехніка, 2001. – 404 с. 7. *Карпович О.Я.* Базовая нелинейная модель вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Вестник НТУ “ХПИ”.* – 2003. – №10. – Т.2. – С. 396-397. 8. *Карпович О.Я.* Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2003. – №4. – С. 42-45. 9. *Карпович О.Я.* Разработка моделей с упрощенными контурами тока для вентильно-индукторного микроэлектропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Вестник НТУ “ХПИ”.* Серия “Электротехника, электроника и электропривод”. – 2004. – №43. – С. 91-94. 10. *Карпович О.Я.* Методика настройки регулятора скорости вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко / *Матер. XI-й межд. конф. по автоматич. управлению. “Автоматика-2004” в 7-ми томах.* – К.: Нац. ун.-т пищевых технологий, 2004. – Т.2. – С. 29. 11. *Карпович О.Я.* Разработка нелинейной модели двухквadrантного вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Труды межд. науч.-техн. конф. “Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении – ИКТМ 2003”.* – Харьков: Нац. аэрокосмич. ун.-т “ХАИ”, 2003. – С. 99. 12. *Карпович О.Я.* “Быстрая” нелинейная модель вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Матер. межд. науч.-техн. конф. “Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах”.* – Севастополь: СевНТУ, 2004. – С. 28-29. 13. *Карпович О.Я.* Модель и настройка контура тока вентильно-индукторного электропривода / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Научн. труды Донецкого национ. технич. ун.-та.* Серия “Вычислительная техника и автоматизация”. – 2005. – №88. – С. 23-29. 14. Идентификация параметров вентильных реактивных электродвигателей / О.А. Онищенко, А.С. Порайко, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // *Вестник НТУ “ХПИ”.* – 2005. – №36. – С. 57-62. 15. ООО “Завод «Электротехника»”. [Электронный ресурс]: www.blpm-motors.com. 16. *Онищенко О.А.* Представлення кривих намагнічування при моделюванні мікрокомпресора з вентильно-індукторним електродвигуном / О.А. Онищенко // *Вестник Херсонского национ. технич. ун.-та.* – 2006. – №2(25). – С. 366-371. 17. [Электронный ресурс]: <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>.

Поступила в редколлегию 12.05.2011