

ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

К-т техн. наук Ар.С. Маслий, инженер Ан.С. Маслий

ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЕНТИЛЬНО-  
ИНДУКТОРНОГО ДВИГУНА

К-т техн. наук Ар.С. Маслий, інженер Ан.С. Маслий

STUDY FOR ADEQUATE MATHEMATICAL MODELS SWITCHED-INDUCTOR  
ELECTRIC MOTOR

Candid. of Techn. Sciences Ar. Masliy, engineer An. Masliy

*В статье рассмотрена адекватность математической модели индукторного четырехфазного электромеханического преобразователя энергии совместно с системой управления, с целью дальнейшего её использования в качестве основного инструмента при исследовании режимов работы. Для моделирования в качестве исходных данных взяты параметры вентильно-индукторного двигателя, разработанного одесским научным коллективом. Основное внимание исследований в данной работе направлено на получение динамических характеристик машины. Кроме того, проведено исследование адекватности существующих математических моделей вентильно-индукторного двигателя для дальнейшего использования при настройке регуляторов.*

**Ключевые слова:** вентильно-индукторный двигатель, датчик положения ротора, электронный коммутатор.

*У статті розглянута адекватність математичної моделі індукторного чотирьохфазного електромеханічного перетворювача енергії спільно з системою керування, з метою подальшого її використання в якості основного інструменту при дослідженні режимів роботи. Для моделювання в якості вихідних даних взяті параметри вентильно-індукторного двигуна, розробленого одеським науковим колективом. Основна увага досліджень в даній роботі спрямована на одержання динамічних характеристик машини. Крім того, проведено дослідження адекватності існуючих математичних моделей вентильно-індукторного двигуна для подальшого використання при налаштуванні регуляторів.*

**Ключові слова:** вентильно-індукторний двигун, датчик положення ротора, електронний комутатор.

*The article considers the adequacy of the mathematical model of the inductor four-phase electromechanical energy converter in conjunction with the control system, in order to further its use as the main tool in the study of modes of operation. For the simulation as input parameters are taken valve-inductor motor developed Odessa research team. Proposed in how to configure the controller gain factor involves the definition of a constructive view along curves of the dependence of the flux current and rotor position. It is assumed that working for appearance will be the area in which its magnetic system is saturated. However working zone characterized unsaturated magnet system, then only the local saturation of the stator teeth and the rotor. But this approach does not provide the necessary quality of transients during acceleration feel. In view of the nonlinear structures proposed method for setting the coefficients of regulators linearized magnet system is unacceptable. The main focus of research in this paper is aimed at obtaining the dynamic characteristics of the machine. In addition, a study of the adequacy of existing mathematical models of four-phase switched-inductor electric motor for later use when you configure the controllers.*

**Keywords:** switched-inductor electric motor, rotor position sensor, the electronic switch.

**Введение.** На сегодняшний день развитие микросхемотехники позволяет расширить функциональные возможности электропривода, а также создать микропроцессорные системы управления. Использование бесконтактных датчиков нового поколения, применения электронной преобразовательной техники дало толчок к развитию вентильно-индукторных приводов.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Как известно, вентильно-индукторный двигатель (ВИД) характеризуется существенными нелинейностями. Анализ литературных источников показал, что для настройки регуляторов скорости либо тока ВИД применяется линеаризация магнитной системы. Предложенные различные методики настройки предполагают определение конструктивного коэффициента ВИД по кривым зависимостей потокосцепления от тока и положения ротора. При этом предполагается, что рабочей для ВИД будет зона, в которой его магнитная система является насыщенной. Однако для такой машины характерны рабочие зоны с ненасыщенной магнитной

системой, то есть имеются лишь локальные насыщения зубцов статора и ротора. Но такой подход не обеспечивает необходимое качество переходных процессов при разгоне ВИД. С учетом вышесказанного, нахождение коэффициентов регуляторов в основном производится с использованием математической модели объекта регулирования. Поэтому адекватность модели такого типа машины отображается на качестве настройки регуляторов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время для моделирования электромеханических систем на основе ВИД используется:

- моделирование на основе решения дифференциальных уравнений электрических цепей фаз ВИД [1];
- моделирование на основе цепно-полевой математической модели [2];
- моделирование на основе подхода обобщенного электромеханического преобразователя энергии [3].

**Основная часть исследования.** ВИД представляет собой электромехатронную систему, функциональная схема которой приведена на рис.1.

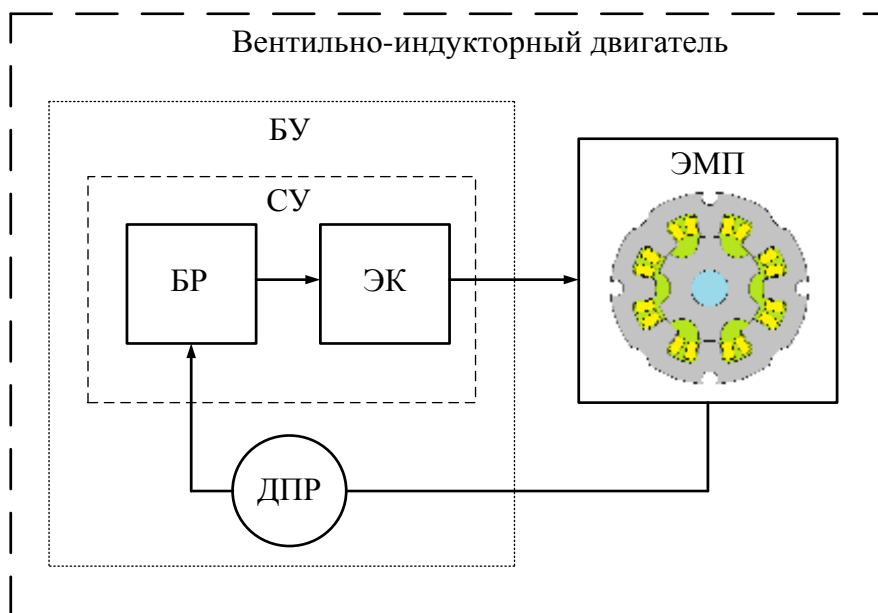


Рис. 1. Функциональная схема ВИД

ВИД включает в себя электромеханический преобразователь (ЭМП) и блок управления (БУ). БУ состоит из системы управления (СУ) и датчика положения ротора (ДПР). Функциональное назначение этих элементов следующее: электронный коммутатор (ЭК) обеспечивает питание фаз ЭМП однополярными

импульсами напряжения прямоугольной формы, блок регулирования (БР) в соответствии с заложенным в него алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом. ЭК выполнен по схеме Миллера [5] (рис.2).

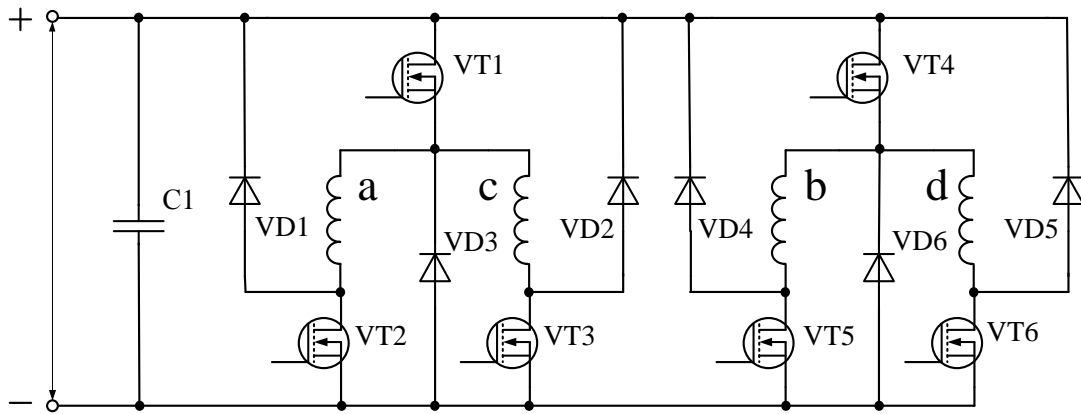


Рис. 2 Схема ЭК четырехфазного ВИД с шестью транзисторами

В работе [4] представлена математическую модель ВИД на основе решения уравнения Лагранжа для электромеханической системы с учетом взаимного влияния магнитных потоков смежных фаз двигателя. При этом в качестве

объекта управления был использован четырехфазный ВИД, разработанный научным коллективом, под руководством д.т.н. профессора Рымши В.В. Технические данные такой машины приведены в табл. 1.

Таблица 1 –

Технические данные ВИД

Геометрические параметры ротора		Электромеханические параметры	
Диаметр ротора, мм	28,7	$U_H, В$	27
Активная длина ротора, мм	30	$I_H, А$	2,5
Диаметр расточки статора, мм	29	$M_H, Нм$	0,05
Ширина зубца статора, мм	5,5	$n_H, об / мин$	4500
Ширина зубца ротора, мм	6,1	$R_\phi, Ом$	0,68
Число витков фазы	60	$L_d, мГн$	1,72
Момент инерции, кг/м <sup>2</sup>	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$L_q, мГн$	0,36

Для контроля положения ротора, а также скорости и направления его вращения, использован встроенный в конструкцию ВИД оптический инкрементальный датчик HEDS-9140, позволяющий получить 360 импульсов за один оборот вала.

Используя различные подходы к моделированию ВИД были созданы математические модели машины. Характеристики фазного напряжения и тока для этих моделей при моменте

сопротивления 0,03 Нм представлены на рис. 3 (а – эксперимент; б – математическая модель с учетом взаимного влияния фаз двигателя; в – математическая модель в среде MATLAB из библиотеки SymPowerSystems пакета Simulink; г – математическая модель на основе подхода обобщенного электромеханического преобразователя энергии). Их сравнительный анализ приведен в таблице 2.

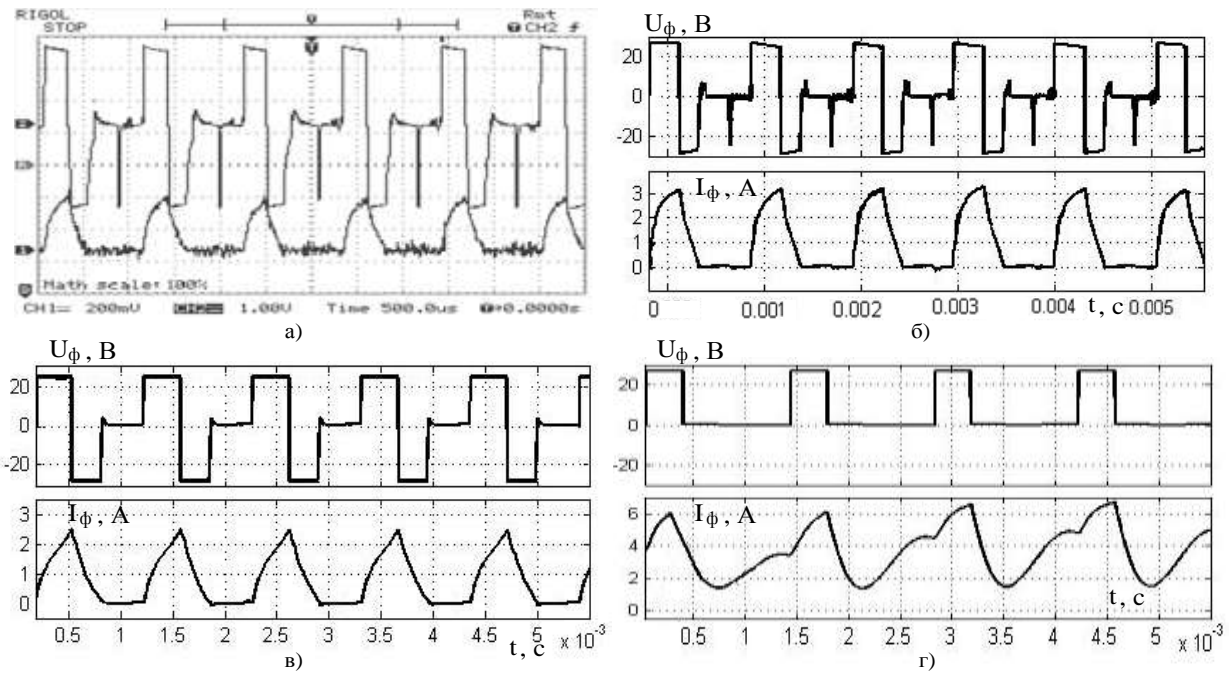


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения фазы ВИД, снятые при помощи различных моделей для  $M_c=0,03 \text{ Нм}$

Таблица 2 –

Сравнительный анализ адекватности мат. моделей ВИД

Тип модели	Параметр					
	I <sub>φmax</sub>		I <sub>φср</sub>		n	
	Знач. А	Откл. %	Знач. А	Откл. %	Знач. об/мин	Откл. %
Эксперимент	3,2	-	1,07	-	10000	
С учетом взаимного влияния фаз	3,1	3,13	1,16	7,4	10330	3,3
В среде MATLAB	2,6	18,75	0,82	23,4	9120	9,8
На основе обобщенного ЭМП	6,25	95	2,93	174	8150	18,5

**Выводы из исследования, перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.**

Из результатов, приведенных в таблице 2, следует, что при моделировании ВИД с учетом взаимного влияния фаз ошибка по основным координатам находится

в пределах 3-7% (для двух других моделей ошибка составляет 10-174%). Это подтверждает адекватность используемой математической модели и правильность подхода к моделированию машины при дальнейшем использовании ее для более качественной настройки регуляторов.

**Список использованных источников**

1. Рябов Е.С. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода [Текст] / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // Электротехника і електромеханіка.– 2009.– №5. – С. 67–72.
2. Рымша В.В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя [Текст] / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, П.А. Кравченко // Электротехника і електромеханіка.– 2010.– №5. – С. 24-26.
3. Голландцев Ю.А., Вентильные индукторно-реактивные двигатели [Текст] / Голландцев Ю.А – Санкт-Петербург: Издательство центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», 2003. – с. 147.

## **Автоматизовані системи електричного транспорту**

---

4. Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа: дис. к.т.н.: 05.09.03 [Текст] / Маслий А. С. Харьков, 2014. – 192 с

5. Гулый М.В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции лёгких: дис. к.т.н.: 05.09.01 [Текст] / Гулый М.В. Одесса, 2010. – 169 с.

---

Маслий Артем Сергійович, к-т техн. наук, асистент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел. : +38974137970. E-mail: a.masliy@bk.ru.

Маслий Андрій Сергійович, інженер ТОВ «Укртрансигнал». Тел.: + 380965426745. E-mail: an\_com@ukr.net.

Artem Masliy, Candid. of Techn. Sciences assistant of the department of the automated systems of electric transport of Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: +38974137970. E-mail: a.masliy@bk.ru.

Andrey Masliy, engineer of OLL «Ukrtransignal». Tel.: +380965426745. E-mail: an\_com@ukr.net.

*Стаття постуила 21.04.2015*