

УДК 629.423:621.313

# ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

*Приведена імітаційна модель тягово-го вентиляно-індукторного електроприводу, визначені її параметри і функціональні зв'язки. Модель дозволяє досліджувати процеси електромеханічного перетворення енергії у всіх режимах його роботи*

**Ключові слова:** вентиляно-індукторний електропривод, тяговий двигун, імітаційна модель

*Представлена имитационная модель тягового вентиляно-индукторного электропривода, определены ее параметры и функциональные связи. Модель позволяет исследовать процессы электромеханического преобразования энергии во всех режимах его работы*

**Ключевые слова:** вентиляно-индукторный электропривод, тяговый двигатель, имитационная модель

*Imitation model of traction switched-reluctance drive is presented, defined its parameters and functional relations. The model allows to investigate the processes of electromechanical conversion of energy in all its working modes*

**Key words:** switched-reluctance drive, traction engine, simulation model

**Б.Г. Любарский**

Кандидат технических наук, доцент\*

**Е.С. Рябов**

Ассистент\*

**Л.В. Оверьянова**

Ассистент\*

\*Кафедра электрического транспорта и тепловозостроения

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел. (057) 707-65-30

E-mail: lboris@kpi.kharkov.ua

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие тяговых электроприводов с высокими технико-экономическими показателями. Помимо электроприводов традиционного исполнения асинхронных, синхронных и с двигателями постоянного тока, активно развивается направление тяговых вентиляно-индукторных электроприводов (ВИЭП), основой которого являются реактивный индукторный двигатель (РИД) и полупроводниковый (вентильный) преобразователь [1]. Согласно исследованию [2...4], энергетическая эффективность ВИЭП на 2-5% выше, чем асинхронного привода, а простота конструкции двигателя и схемы инвертора делают его более привлекательным для изготовителей. Однако в настоящее время развитие ВИЭП тормозится отсутствием апробированных методик проектирования таких приводов. Для решения этой проблемы в работе [5] разработана имитационная модель тягового вентиляно-индукторного электропривода и определены ее параметры и функциональные связи.

В работе поставлена цель: провести имитационное моделирование процессов в вентиляно-индукторном электроприводе на базе математической модели.

Для составления расчетных уравнений математической модели была использована принципиальная схема силовых цепей ВИЭП, приведенная на рис. 1.

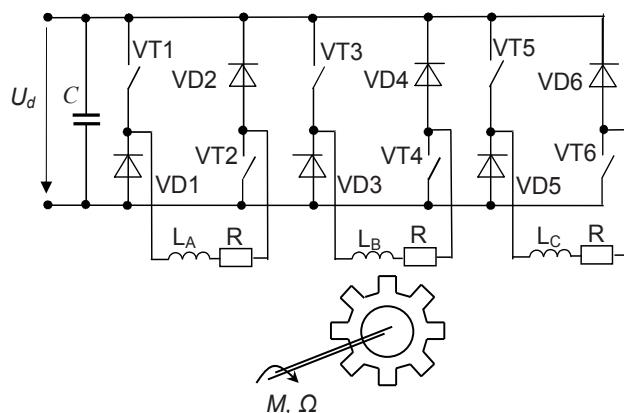


Рис. 1. Принципиальная схема силовых цепей тягового ВИЭП: С – конденсатор, VT1-VT6 – ключи, VD1-VD2 – запирающие диоды, LA, LB, LC – индуктивности фазы А, В, С соответственно, R – активное сопротивление

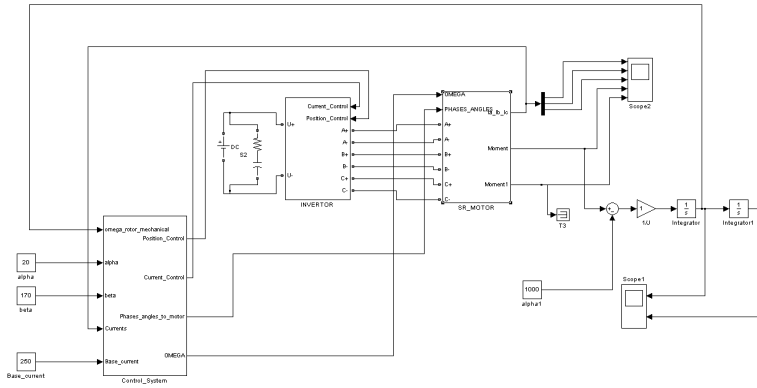


Рис. 2. Simulink-модель ВИЭП

Предлагаемая имитационная модель реализована в среде MATLAB и в его приложении Simulink [6]. Модель ВИЭП состоит из следующих подсистем (рис. 2): – подсистема SR\_Motor; подсистема INVERTOR; подсистема Control\_System; подсистема, описывающих механическую часть ВИЭП; регистраторы сигналов Scope 1, 2. В подсистеме SR\_Motor ”собрана” структурная схема двигателя. Блок состоит из трёх идентичных фаз (phase\_A,B,C рис. 3). На вход каждой из фаз подается значения токов  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ , угол поворота ротора  $\gamma$  и угловую  $\Omega$  скорость. Структура и принцип функ-

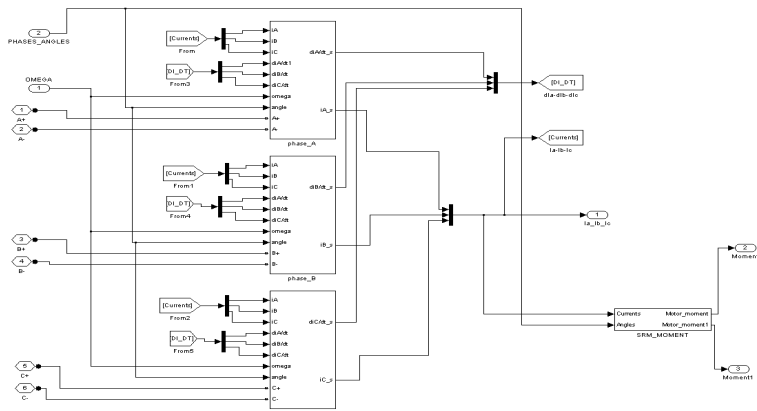


Рис. 3. Подсистема SR\_Motor

ционирования каждой фазы аналогичен. Ограничимся рассмотрением фазы А (рис. 4). Входные сигналы (токи и угол поворота) служат для вычисления трёх производных потокацепления фазы А:  $\frac{d\Psi_A}{di_B}$ ,  $\frac{d\Psi_A}{di_C}$  и  $\frac{d\Psi_A}{d\gamma}$ . После перемножения входных величин на соответствующие им производные, сигналы суммируются и подаются на вход интегратора. Далее путем интегрирования вычисляем ток фазы, а затем момент, развиваемый фазой А. Путем суммирования моментов фаз А, В, и С на выходе получаем искомый момент  $M_{дв}$ .

Преобразование постоянного напряжения на входе в переменное импульсное, которое подается на фазные обмотки двигателя, осуществляется инвертором напряжения, в основу которого положена полумостовая схема (рис. 5). В данной Simulink-модели использованы управляемые IGBT-транзисторы. Входными параметрами являются сигналы, поступающие от системы управления на отпирание/закпирание транзисторов. Математические модели транзисторов и диодов позаимствованы из системы Matlab/Simulink без изменений.

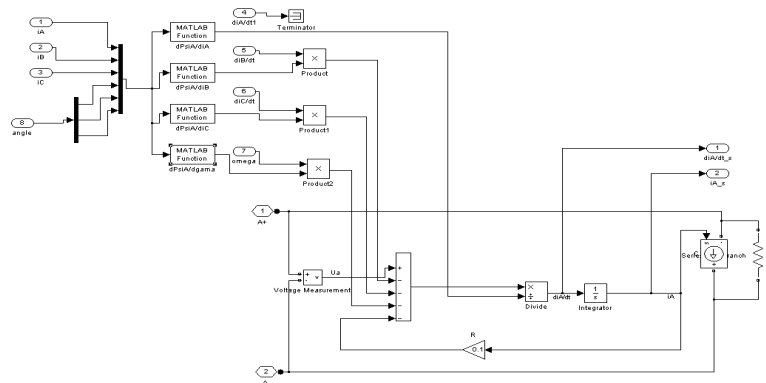


Рис. 4. Simulink-модель фазы РИД

Подсистема Control\_System реализует систему управления ВИЭП (рис. 6). Входными сигналами являются значения токов фаз и угла поворота. На выходе имеем сигналы на включение/выключение транзисторов силового инвертора. Управление осуществляется как по ”токовому коридору”, так и по углу поворота ротора.

С помощью разработанной модели были получены следующие расчетные зависимости. На рис. 7 приведены осциллограммы фазных напряжений и токов при скорости вращения ротора 10 рад/с и разных значениях тока уставки: 100 А и 250 А соответственно. Из осциллограмм видно, что при

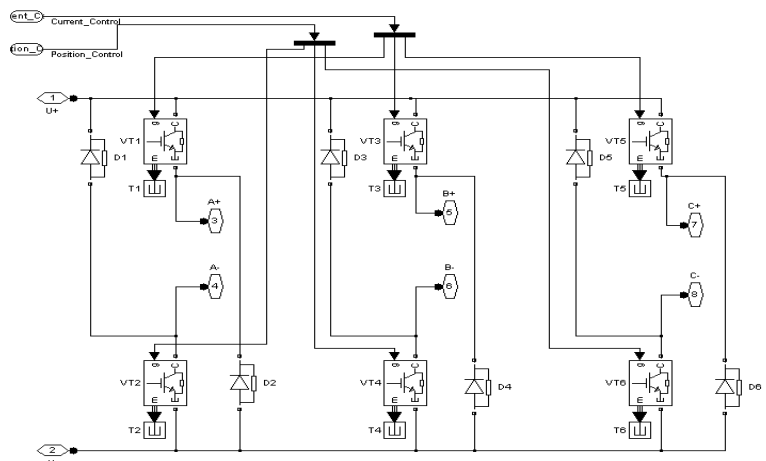


Рис. 5. Подсистема INVERTOR

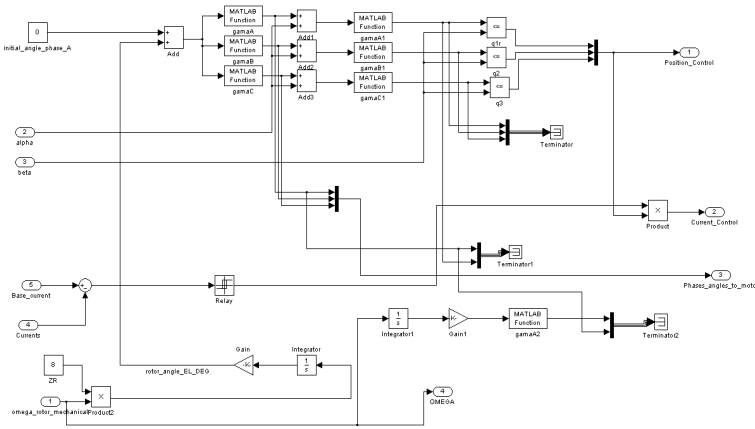


Рис. 6. Подсистема Control\_System

больших токах, при которых магнитная система двигателя насыщена, индуктивность фазы уменьшается и ток нарастает и спадает более интенсивно, чем в случае, когда магнитная система ненасыщена (при малых токах). При низких скоростях вращения управление двигателем осуществляется в режиме токового коридора.

На рис. 8а приведена кривая электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя, развиваемого возбуждённым фазным полюсом, при скорости вращения ротора 10 рад/с и токе уставки 100 А. На рисун-

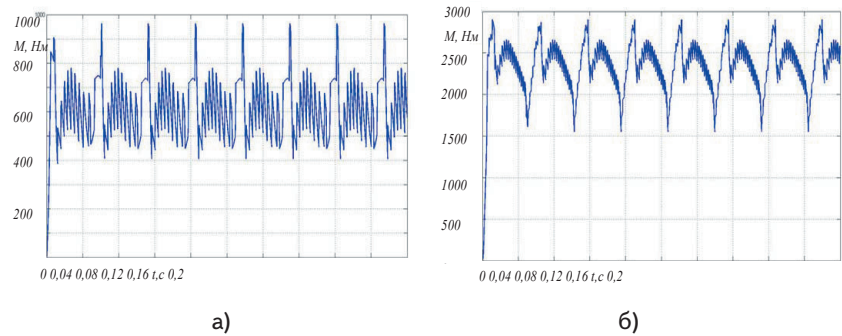


Рис. 8. Кривая момента при а)  $\Omega=10$  рад/с,  $I_{уст}=100$  А, б)  $\Omega=10$  рад/с,  $I_{уст}=250$  А

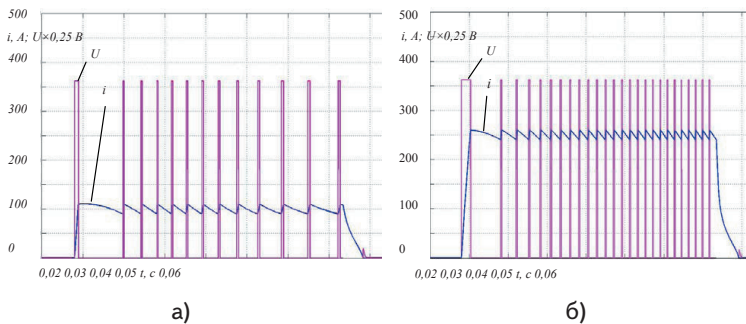


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений при а)  $\Omega=10$  рад/с,  $I_{уст}=100$  А, б)  $\Omega=10$  рад/с,  $I_{уст}=250$  А

ке хорошо видны пульсации момента на валу машины, колеблющиеся от 400 до 950 Нм. Это обусловлено формой кривой фазного тока (рис. 7а), величиной воздушного зазора, углом включения (опережения) и длительностью импульса напряжения (тока), подаваемого на обмотку, степенью насыщения зубцов, формой поверхности фазного полюса и зубцов ротора в воздушном зазоре, шириной коронок зубцов статора и ротора. Также следует отметить, что на характер кривой момента влияет частота вращения, поскольку с ее ростом меняется форма фазного тока, а

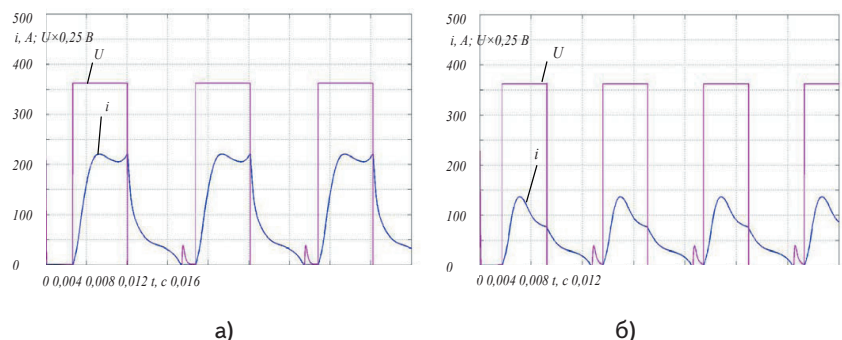


Рис. 9. Осциллограммы токов и напряжений при а)  $\Omega=130$  рад/с,  $I_{уст}=250$  А, б)  $\Omega=300$  рад/с,  $I_{уст}=250$  А

следовательно меняется и форма результирующего момента.

На рис. 8б приведена кривая момента для номинального тока двигателя, равного 250 А. Анализ показывает, что постоянная составляющая момента равна 2480 Нм. Частота периодических колебаний электромагнитного момента равна 37 Гц. Однако, как и в случае на рис. 8а, в кривой момента присутствуют высшие гармоники, оказывающие значительное влияние на процессы преобразования энергии в электрической машине. Высшие гармоники в воздушном зазоре машины появляются из-за особенностей конструкции машины.

На рис. 9а приведены осциллограммы фазного напряжения и тока при скоро-

сти вращения ротора 130 рад/с. Амплитуда тока достигает отметки 220 А. Здесь преобразователь работает в одноимпульсном режиме. Канал управления по току не работает (фазный ток не успевает достичь тока уставки), поскольку частота вращения ротора достаточно высока и существенное влияние оказывает отрицательная обратная связь по ЭДС.

На рис. 9б показаны осциллограммы напряжения и тока при скорости вращения ротора 300 рад/с и токе уставки 250 А. Амплитуда тока достигает 140 А. Из рисунка видно, что происходит значительное «деформирование» кривой тока из-за действия противоЭДС двигателя, что приводит к

снижению электромагнитного момента.

### Выводы

Таким образом, было показано, что разработанная математическая модель тягового вентиляльно-индукторного электропривода позволяет комплексно исследовать процессы электромеханического преобразования энергии во всех режимах работы электропривода.

Форма тока РИД при работе от инвертора напряжения значительно отличается в режиме токоограничения от таковой при работе в одноимпульсном режиме, что обуславливает разный характер протекания электромагнитных процессов в этих режимах.

Ввиду того, что пульсации электромагнитного момента являются главным недостатком ВИЭП, предлагается увеличивать число фаз РИД и разрабатывать специальные алгоритмы управления приводом с ограничениями пульсаций момента.

### Литература

1. Крамсков С. А. Компьютерное моделирование процессов в вентиляльно-индукторном электроприводе с использованием пакета MathCAD [Текст] / С. А. Крамсков., А. В. Киреев // Электровозостроение: сб. научн. тр. / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения" (ОАО "ВЭЛНИИ"). – Т.45 – Новочеркасск, 2003. – с.239-257.

2. Колпахчян, Г.И. Электроприводы перспективного электроподвижного состава [Текст] / Г.И. Колпахчян, В. И. Захаров // Электровозостроение: сб. научн. тр. / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения" (ОАО "ВЭЛНИИ"). – Т.45 – Новочеркасск, 2001. – с.62-67.

3. Щербаков, В. Г. Применение реактивных индукторных двигателей на перспективном ЭПС [Текст] / В. Г. Щербаков, Г. И. Колпахчян, Б. И. Хоменко // Электровозостроение: сб. научн. тр. / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения" (ОАО "ВЭЛНИИ"). – Т.40 – Новочеркасск, 2001. – с.45-57.

4. Бочаров, В. И. Тяговые электродвигатели электровозов [Текст] / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, Л. Ф. Коломейцев; под ред. В. Г. Щербакова – Новочеркасск: Агенство Наутилус, 1998. – с. 672.

5. Любарский Б. Г. Имитационная модель тягового вентиляльно-индукторного электропривода [Текст] / Б. Г. Любарский, к.т.н., Е. С. Рябов, Л. В. Оверьянова, В. Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №5. – С. 67-72.

6. Дьяконов, В. П. Simulink 4. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – с. 553.

*В статті описані особливості робочого процесу малогабаритної шнекової ступені підвищеної напівності, до складу якої входить шнекове робоче колесо біпланного типу*

*Ключові слова: шнек, напівність, лопацева ґратка*

*В статье описаны особенности рабочего процесса малогабаритной шнековой ступени повышенной напорности, в состав которой входит шнековое рабочее колесо бипланного типа*

*Ключевые слова: шнек, напорность, лопастная решетка*

*In article features of working process small-gabarite axial steps raised pressure into which structure enters axial-flow the driving wheel tandem-bladed type are described*

*Key words: axial steps, pressure, blade elements*

УДК 621.65

## РОБОЧИЙ ПРОЦЕС НАСОСНОЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ ШНЕКОВОЇ СТУПЕНІ З БІПЛАННИМ РОБОЧИМ КОЛЕСОМ

**О.О. Шепеленко**

Молодший науковий співробітник  
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки  
Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсакова 2, м. Суми, Україна, 40007

### Вступ

Сучасні умови діяльності нафтогазової галузі характеризуються тенденцією до зменшення легко-

доступних запасів та збільшення глибин залягання продуктивних пластів до 2000 м і більше [1, 2]. Тому особливо виправданим на пізній стадії розробки нафтових родовищ, коли необхідно застосовувати фор-