

на основі аналізу траєкторії лінії прицілювання дасть змогу судити про ефективність прицілювання.

**Список літератури:** 1. Минин Р.А. Стрельба из пистолета / Р.А. Минин. – М. : Военное Издательство Министерства Обороны Союза ССР, 1954 г. – 68 с. 2. Писарчук А.В. Лазерный триангуляционный имитатор и математическая модель процесса прицеливания для совершенствования техники стрельбы из пистолета / А.В. Писарчук, А.В. Лапин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – №24. – С. 117-121. 3. Злепко С.М. Математична модель сумісності людини і короткоствольної вогнепальної зброї / С.М. Злепко, Д.Х. Штофель, А.А. Шиян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 239-244. 4. Ухтомский А.А. Доминанта / А.А. Ухтомский. – СПб. : Питер, 2002. – 448с.

*Поступила в редколлегию 25.11.2010*

**УДК 629.423: 621.313**

**Е.С. РЯБОВ**, зав. сектором расчетов электрических машин, ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков

**Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», г. Харьков

**Д.И. ЯКУНИН**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», г. Харьков

**Д.Ю. ЗЮЗИН**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», г. Харьков

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО БЕЗРЕДУКТОРНОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ**

В роботі розглядається імітаційна модель тягового безредукторного приводу на основі індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком реалізована в середовищі візуального програмування Simulink. При створенні моделі АІД використаний метод структурних схем. Ключові слова: моделювання, реактивний індукторний двигун з аксіальним магнітним потоком, інвертор напруги, сплайн.

В работе рассматривается имитационная модель тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, реализованная в среде визуального программирования Simulink. При создании модели АИД использован метод структурных схем.

Ключевые слова: моделирование, реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком, инвертор напряжения, сплайн.

In work a simulation model is considered of hauling direct drive on the basis of inductor motor with the axial magnetic thread realized in the visual programming Simulink environment. At creation of the model AIM a method is used of flow diagrams.

Keywords: simulation, transverse flux reluctance motor, voltage converter, spline.

Разработка нового подвижного состава требует углубленного изучения динамических процессов в электрической системе и механической части, выявления их взаимного влияния, изучения влияния внешних воздействий на характер протекания и качественные показатели процессов, происходящих в них. Поскольку натурные экспериментальные исследования, во-первых, увеличивают финансовые затраты и сроки разработки, и, во-вторых, не

позволяют провести всеобъемлющие исследования, а традиционные методы проектирования и исследования в ряде случаев не эффективны, наиболее целесообразным представляется использование математического моделирования [1]. В частности, такой подход необходим при использовании для подвижного состава тяговых приводов нового типа, содержащих нетрадиционные для тяги электрические машины и соответствующие им полупроводниковые преобразователи. Именно таким является тяговый привод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком (АИД) [2].

Подходящим инструментарием для изучения динамики тяговых приводов, на наш взгляд, является имитационное моделирование [3]. Для создания имитационной модели нами принята среда визуального программирования Simulink, которая в сочетании с макетом Matlab предоставляет широчайшие возможности для моделирования электроприводов [4,5].

**Целью статьи** является разработка математических и имитационных моделей звеньев безредукторного тягового привода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Рассматриваемая в статье система тягового привода включает в себя электрическую часть – тяговый преобразователь и систему управления приводом, электромеханическое устройство – тяговый двигатель и

механическую часть, образованную механизмами передачи вращающего момента от двигателя к контакту «колесо-рельс» любую электромеханическую систему можно представить из двух подсистем: электрической и механической. В статье только рассматриваются тяговый двигатель и инвертор для его питания. Схема силовых цепей показана на рис. 1.

Для питания АИД нами выбрана наиболее часто используемая схема полумостового инвертора напряжения [6]. Инвертор напряжения (ИН) состоит из  $m$  ( $m$  - число фаз)

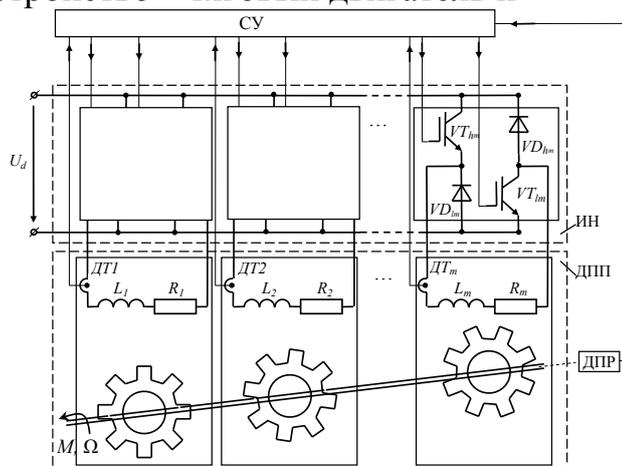


Рис. 1 Схема силовых цепей тягового двигателя и преобразователя

$СУ$  – система управления;  $ИН$  – инвертор напряжения;  $АИД$  – реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком;  $U_d$  – напряжение звена постоянного тока;  $ДТ1, ДТ2, \dots, ДТ_m$  – датчики тока;  $ДПР$  – датчик положения ротора;  $VT1, VT2, \dots, VT_m$  – транзисторы ИН;  $VD1, VD2, \dots, VD_m$  – диоды ИН;  $L_1, L_2, \dots, L_m$  – индуктивности фаз АИД;  $R_1, R_2, \dots, R_m$  – омические сопротивления фаз АИД;  $M$  – момент на валу двигателя;  $\Omega$  – угловая частота вращения ротора

включенных параллельно фазных полумостов.

Каждый полумост содержит два несимметричных плеча, состоящих из управляемого силового ключа – IGBT–транзистора и обратного диода, соединенных последовательно (рис. 2а). На рис. 2б приведена Simulink–модель фазного полумоста ИН. При её создании использованы элементы библиотеки SimPowerSystems. Это позволяет отказаться от разработки математических моделей полупроводниковых приборов.

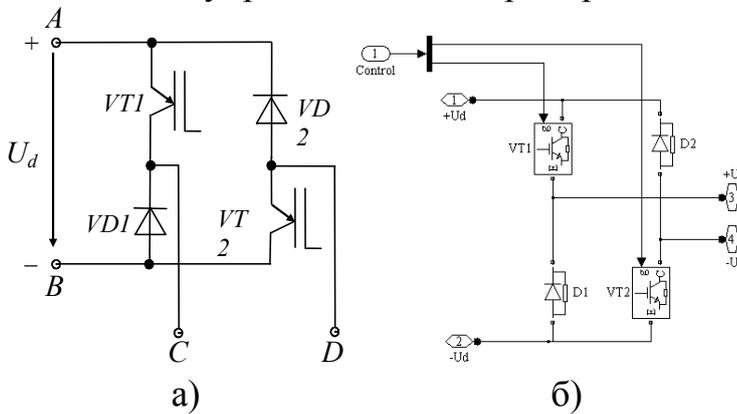


Рис. 2 Электрическая (а) и Simulink (б) модель фазного полумоста ИН

Управление приводом осуществляется системой управления. Система управления имеет два канала: по току и по углу поворота ротора. Входными сигналами являются значения токов фаз и угла поворота. На выходе имеем сигналы на включение/выключение транзисторов силового инвертора.

Построение системы управления и алгоритмов работы аналогично приводу с традиционным реактивным индукторным двигателем, ознакомиться с которыми можно в соответствующей литературе.

В основу *математической модели* АИД положены уравнения электрических контуров, составленные для каждой из фаз. На рис. 3 приведена схема замещения фазы.

Примем допущения, что магнитные системы каждой из фаз двигателя идентичны друг другу, вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе не учитываются, активные сопротивления фаз равны.

Уравнения электрического равновесия запишется в виде:

$$u_x = i_x R + \frac{d\Psi_x}{dt} \quad (1)$$

где  $u_x$  –напряжение, приложенного к обмотке фазы с индексом  $x$ ;  
 $i_x$  – фазный ток;  
 $R$  – электрическое сопротивление фазы;  
 $\Psi_x = \Psi(i_x, \gamma_x)$  – потокосцепление фазы.

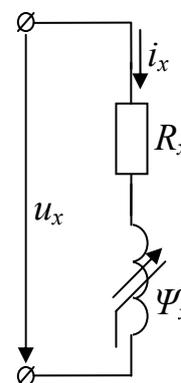


Рис. 3. Схема замещения фазы АИД  
 $u_x$  – напряжение;  $i_x$  – ток;  $R_x$  – омическое сопротивление;  
 $\Psi_x$  – потокосцепление

Преобразуем уравнение (1). Для этого перепишем слагаемое  $\frac{d\Psi_x}{dt}$  в таком виде:

$$\frac{d\Psi_x}{dt} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial i_x} \frac{di_x}{dt} + \frac{\partial\Psi_x}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dt} = L_{\dot{a}x} \frac{di_x}{dt} + K_{ex} \Omega, \quad (2)$$

где  $L_{\dot{a}x} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial i_x}$  – дифференциальная индуктивность;

$K_{ex} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial \gamma}$  – коэффициент противоЭДС.

$\gamma$  – геометрический угол поворота ротора.

Подставив (2) в (1) получим уравнение электрического равновесия в виде:

$$u_x = i_x R + \frac{d\Psi_x}{dt} = i_x R + L_{\dot{a}o} \frac{di_x}{dt} + e_x, \quad (3)$$

где  $e_x = K_{ex} \Omega$  – противоЭДС фазы.

Разрешив уравнение (3) относительно производной тока, получим:

$$\frac{di_x}{dt} = (L_{\dot{a}o}^{-1}) \cdot (u_x - i_x R - e_x). \quad (4)$$

Для описания вращательного движения ротора представим механическую часть в виде одномассовой системы. Тогда уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = M_{\dot{a}\dot{a}} - M_c, \\ \Omega = \frac{d\gamma}{dt} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $J$  – приведенный момент инерции ротора;

$\Omega$  – угловая частота вращения ротора;

$M_{\dot{a}\dot{a}} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \gamma_x)$  – момент на валу (принимается равным

электромагнитному моменту);

$M_x(i_x, \gamma_x)$  – момент, развиваемый фазой с индексом  $x$ ;

$M_c$  – момент сопротивления.

Таким образом, математическая модель АИД имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_x}{dt} = (L_{\dot{a}o}^{-1}) \cdot (u_x - i_x R - K_{ex} \Omega); \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{\dot{a}\dot{a}} - M_c); \\ \frac{d\gamma}{dt} = \Omega; \\ L_{dx} = L_{dx}(i_x, \gamma_x); \\ K_{ex} = K_{ex}(i_x, \gamma_x); \\ M_{\dot{a}\dot{a}} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \gamma_x) \end{cases}, \quad (6)$$

т.е. состоит из дифференциальных уравнений электрических контуров и механической части, и алгебраических уравнений, определяющих электромагнитные связи в двигателе – зависимости  $L_{dx}(i_x, \gamma_x); K_{ex}(i_x, \gamma_x); M_x(i_x, \gamma_x)$ .

Рассмотрим методику определения электромагнитных связей двигателя. Предположим, что зависимость  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$  известна (определена расчётным путём или экспериментально). Типичный вид зависимости  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$  для реактивных индукторных машин показан на рис. 4

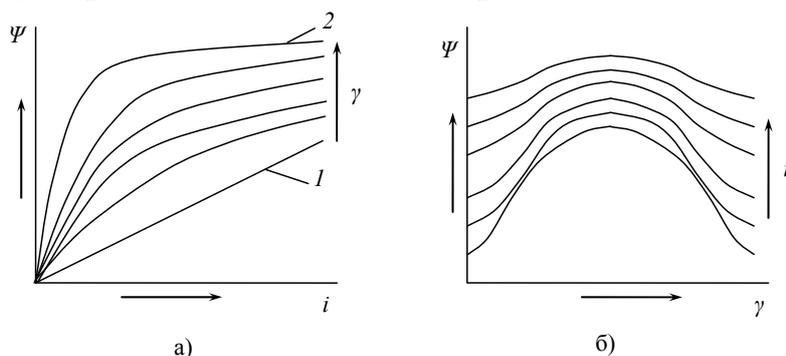


Рис. 4 Зависимости  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$

1 – рассогласованное положение; 2 – согласованное положение

Семейство кривых на рис.4б может быть представлено в общем виде аналитической зависимостью следующего вида:

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left[ \sum_{r=0}^q (A_r(i) \cdot \cos(k\gamma) + B_r(i) \cdot \sin(k\gamma)) \right], \quad (7)$$

т.е. является усечённым рядом Фурье (число удерживаемых гармоник равно  $N$ ), коэффициенты которого являются полиномиальными функциями тока.

Вследствие симметрии зубцов, кривые на рис.4б симметричны относительно оси ординат. Поэтому ряд Фурье не содержит синусных составляющих, и формулу (7) можно переписать в виде:

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N (A_k(i) \cdot \cos(k\gamma)), \quad (8)$$

где  $A_k(i) = \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$  – кубический интерполяционный сплайн, аппроксимирующий зависимость коэффициентов Фурье-разложения от тока фазы [7]. В этом выражении  $a_{s,j-1}^{(k)}$  – коэффициент сплайна при степени  $s$  на отрезке  $[i_{j-1}, i_j]$  для гармоники с номером  $k$ , ( $i_{j-1}, i_j$  – узлы интерполяции, ограничивающие отрезок, содержащий текущее значение тока  $i$ ). Под  $\gamma$  здесь и в дальнейшем будем подразумевать угол поворота ротора, выраженный в электрических радианах.

Таким образом,

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (9)$$

Запись зависимости  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$  в виде (9) позволяет аналитически выразить индуктивность, коэффициент противоЭДС и момент.

Дифференциальная индуктивность определяется по формуле  $L_{\dot{a}} = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial i}$ . Тогда, с учётом формулы (5) получим выражение:

$$L_{\dot{a}} = \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=1}^3 a_{s,j-1}^{(k)} \cdot s \cdot (i - i_{j-1})^{s-1} \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (10)$$

Дифференцирование по току здесь допустимо, поскольку сплайн является дважды непрерывно дифференцируемой функцией на всём отрезке интерполяции.

Коэффициент противоЭДС равен  $K_e = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial \gamma}$  или

$$K_e = -Z \sum_{k=0}^N \left( k \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right), \quad (11)$$

где  $Z$  – число зубцов. Множитель  $Z$  в формуле (11) учитывает то, что дифференцирование происходит по геометрическому углу, а  $\gamma$  есть электрический угол.

Электромагнитный момент определяется по выражению

$$\dot{W} = \left. \frac{\partial W'}{\partial \gamma} \right|_{i=const}, \quad (12)$$

где  $W' = \int_0^i \Psi(i, \gamma) di$  – мгновенное значение коэнергии фазы. Поскольку подынтегральное выражение  $\Psi(i, \gamma)$  задано в виде сплайнов, интегрирование проводим по методу интерполирующих сплайнов.

Общее выражение имеет вид:

$$W'(i, \gamma) = \int_0^i \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right) di.$$

Поскольку нас интересуют численные значения, поступим следующим образом.

Пусть  $p$  – номер интервала, в котором находится верхний предел интегрирования  $i_p$ . Тогда расчётная формула для вычисления коэнергии примет вид:

$$W'(i_p, \gamma) = \sum_{q=1}^p \left( \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,q-1}^{(k)} \frac{(i_q - i_{q-1})^{s+1}}{s+1} \right) \cos(k\gamma) \right) \right). \quad (13)$$

Выполнив вычисления по формуле (10), получим данные, для которых выполним процедуру аппроксимации. Полученную зависимость представим в виде:

$$W'(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N (B_k(i) \cdot \cos(k\gamma)),$$

где  $B_k(i) = \sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$  – кубический интерполяционный сплайн, аппроксимирующий зависимость коэффициентов Фурье-разложения от тока фазы. В этом выражении  $b_{s,j-1}^{(k)}$  – коэффициент сплайна при степени  $s$  на отрезке  $[i_{j-1}, i_j]$  для гармоники с номером  $k$ , ( $i_{j-1}, i_j$  – узлы интерполяции, ограничивающие отрезок, содержащий текущее значение тока  $i$ ). Таким образом,

$$W'(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (14)$$

Выполнив дифференцирование выражения (14) по углу поворота, имеем:

$$M = -Z \sum_{k=0}^N \left( k \left( \sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right). \quad (15)$$

Отдельно следует отметить, что число гармоник разложения в ряд Фурье выбирается из условия обеспечения погрешности не более 2%. При построении сплайнов используются краевое условие «отсутствие узла», т.к. неизвестна информация о поведении сплайнов вблизи границ отрезка интерполяции.

Для создания **имитационной модели** АИД в Simulink на основании уравнения (4) составим структурную схему фазы двигателя (рис. 15а). Simulink–модель фазы двигателя приведена на рис. 15б.

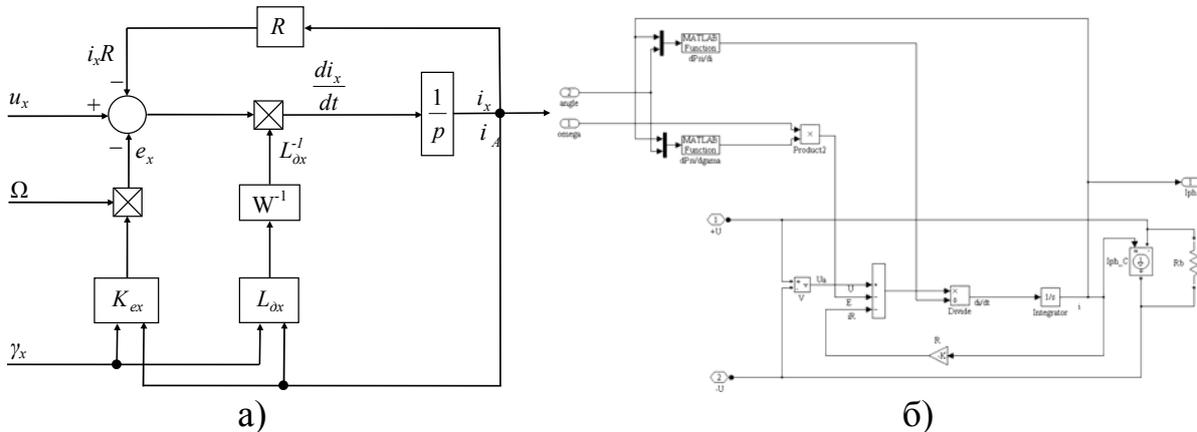


Рис. 15 Структурная схема (а) и Simulink-модель (б) фазы двигателя

Структурная схему механической части привода, составленная по уравнениям (5), приведена на рис. 16а. Simulink–модель механической части на примере четырёхфазного АИД приведена на рис. 16б.

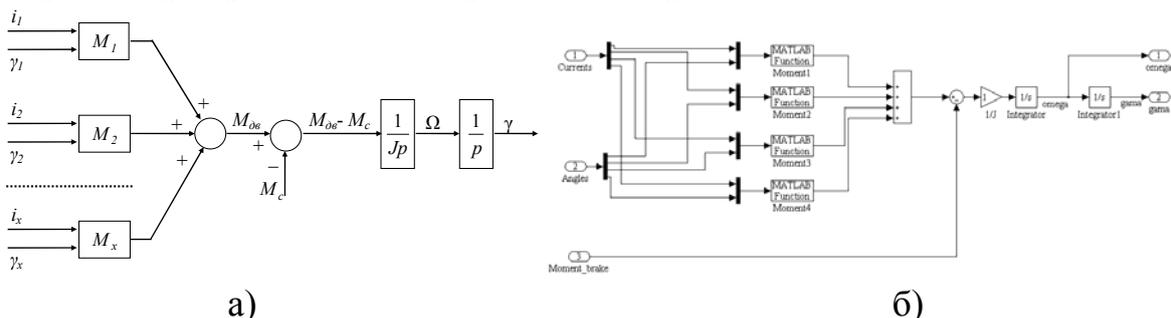


Рис. 17 Структурная схема (а) и Simulink–модель (б) механической части

Создание общей Simulink- модели тягового привода производится по общим правилам создания моделей в Simulink с учётом тех задач, которые ставит исследователь.

### **Выводы.**

Разработана имитационная модель тягового привода на основе АИД. Имитационная модель состоит из модели полупроводникового преобразователя, модели тягового индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, модели механической части и модели системы управления.

Модель преобразователя собрана на основании его электрической схемы с использованием элементов библиотеки SimPowerSystems.

Разработана математическая модель АИД. Особенностью модели является то, что электромагнитные связи предложено аппроксимировать усечённым рядом Фурье, коэффициенты гармоник которого интерполированы кубическими сплайнами. На основании этого разложения аналитически выражены индуктивность фазы, коэффициент противоЭДС и электромагнитный момент, для которого также проведена аппроксимация по упомянутому выше способу. На основании математической модели разработана Simulink-модель АИД.

Разработанная имитационная модель позволяет моделировать динамические процессы, происходящие как в приводе в целом, так и в отдельных его звеньях, обрабатывать законы регулирования и исследовать влияние параметров отдельных элементов на процессы электромеханического преобразования энергии.

**Список литературы:** 1. Бахвалов Ю. А., Зарифьян А. А., Кашников В. Н., Колпахчян П. Г., Плохов Е. М., Янов В. П. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом, М – «Транспорт», 2001, 288с. 2. Рябов Е.С. Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков, НТУ «ХПИ» 2010. – №38. – С.80-83. 3. Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В. и др. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода // Електротехніка і електромеханіка, 2009, №5. – С.67-72. 4. Дьяконов, В. П. Simulink 4. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2001. – с. 553. 5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. ИД Питер. 1-е издание, 2007 , 288 стр. 6. Тяговые двигатели электровозов / Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 627 с. 7. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с., ил.

*Поступила в редколлегия 08.12.2010*

**УДК 656.13:658**

***А.Н. ГОРЯИНОВ***, канд. техн. наук, доцент, ХНАГХ, г. Харьков

### **ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

Предложена классификация объектов транспорта. Рассмотрены существующие подходы к определению объектов диагностирования с позиций экономической диагностики. Выделены