

УДК 621.313

В. О. Квашнин, канд. техн. наук,
А. В. Бабаш

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СКОРОСТНОЙ И ТОКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аннотация. Для нахождения динамической скоростной характеристики была разработана методика определения угловой скорости электропривода посредством импульсного датчика. Рассмотрены недостатки и ограничения существующих методик. Приведены расчетные соотношения разработанной методики. Описан метод получения и дальнейшей обработки токовой характеристики.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, динамическая характеристика, методика, импульсный датчик, скоростная характеристика, токовая характеристика

V. Kvashnin, PhD.,
A. Babash

DETERMINING OF DYNAMIC ROTARY SPEED AND CURRENT CHARACTERISTICS METHODS OF ASYNCHRONOUS ELECTRICAL DRIVE

Abstract. The method for determining rotary speed characteristic of asynchronous electrical drive by means of pulse transmitter was developed. Defects and limitations of existing methods are considered. The equations of developed methods are given. The method of current characteristic data receiving and their further processing is given here.

Keywords: induction motor, dynamic characteristic, method, incremental encoder, rotary speed characteristic, current characteristic

В. О. Квашнін, канд. техн. наук,
А. В. Бабаш

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ШВИДКІСНОЇ ТА СТРУМОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Анотація. Для знаходження динамічної швидкісної характеристики була розроблена методика визначення кутової швидкості електроприводу імпульсним датчиком. Розглянуто недоліки та обмеження існуючих методик. Наведено розрахункові співвідношення розробленої методики. Описано метод отримання та подальшої обробки струмової характеристики.

Ключові слова: асинхронний двигун, динамічна характеристика, методика, імпульсний датчик, швидкісна характеристика, струмова характеристика

Введение. Определение динамических параметров и характеристик сложных электромеханических систем, необходимых для построения математических моделей и проектирования асинхронных электроприводов, требует определенных средств измерений и методик обработки полученной информации, которые в каждом конкретном случае могут быть оригинальными и иметь свои особенности [1 – 5].

Для разработки, настройки частотного электропривода возникает необходимость в точном определении мгновенных значений угловой скорости электропривода и тока статорной обмотки асинхронного электродвигателя для различных режимов его работы (пуска, наброса нагрузки, торможения и т. д.). В литературе [6 – 7] описаны методики определения угловой скорости электропривода с помощью импульсного фотодатчика и в [8 – 9] обработки данных по полученному алгоритму с использованием пакета программ Excel.

Существующая методика, к сожалению, не позволяла проводить обработку результатов измерений в более длительном интервале времени и была ограничена выборкой массива не более 65000 числовых значений (возможности электронных таблиц Excel).

Это обстоятельство не позволяло проводить точные измерения в более широком интервале времени или диапазоне измеряемых значений. Разработанная методика в пакете прикладных программ MatLab хотя и давала хорошие результаты, но имела ограниченные возможности (до 500000 точек) [10]. Поэтому целью данной работы является разработка методик определения динамической скоростной и токовой характеристик асинхронного электродвигателя, а также определение соответствующих их усредненных и среднедействующих значений.

Материалы исследований

Для расчета угловой скорости, измеренной при помощи импульсного датчика ПДФ5 (600 импульсов за оборот), используются расчетные соотношения для преобразования исходных двоичных массивов данных скорости в читабельные, удобные для восприятия единицы измерения (c^{-1}).

Импульсные сигналы с датчика скорости снимаются при помощи АЦП L-Card. Сбор данных в файл осуществляется посредством приложения LGraph. Массив данных впоследствии может быть обработан при помощи методики, которая может быть реализована в виде приложения, разработанного на любом языке программирования высокого уровня. Одной из задач в данной работе является представление мето-

дики определения угловой скорости в виде расчетных математических соотношений.

Шаг угла поворота датчика скорости при прохождении «светлого» и «темного» участка диска определяется расчетным соотношением

$$\Delta\phi = \frac{2 \cdot \pi}{N}, \quad (1)$$

где N – число импульсов датчика скорости. Напряжение перехода с «логического нуля» на «логическую единицу» и наоборот («темного» и «светлого» участков) U_n используется для фиксации изменения уровня сигнала из импульсного датчика.

Массив данных скорости b_{ω_i} представлен в виде диаграммы напряжений импульсного датчика скорости во времени (рис. 1).

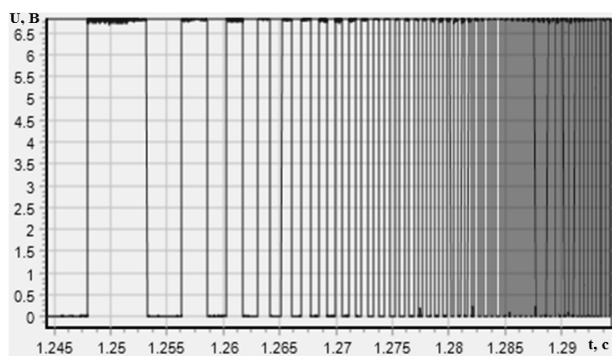


Рис. 1. Диаграмма напряжений импульсного датчика во времени

Заданное число итераций фильтрации скорости $N_{\text{но}}$ определяет, сколько раз будет осреднен рассчитанный массив данных угловой скорости.

Массив данных угловой скорости определяется следующим расчетным соотношением

$$\omega_j = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\Delta\phi}{t_c \cdot c_{\omega_j}}, \quad (2)$$

где Δt – приращение времени на определенном участке.

Приращение времени на определенном участке определяется при помощи соотношения

$$\Delta t = t_c \cdot c_{\omega_j}, \quad (3)$$

где $t_c = 1/f_{\text{АЦП}}$, $f_{\text{АЦП}}$ – частота опросов L-Card; c_{ω_j} – массив суммы участков «логического нуля» и «логической единицы» одного оборота датчика скорости (рис. 2)

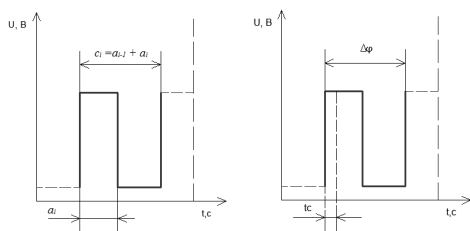


Рис. 2. Графическая иллюстрация функционирования методики определения скорости

Массив суммы точек «логической единицы» и «логического нуля» одного оборота датчика скорости определяется по формуле

$$c_{\omega_j} = a_{\omega_j} + a_{\omega_{j-1}}, \quad (4)$$

где a_{ω_j} – массив числа импульсов «логического нуля» или «логической единицы»; j – целое число.

Текущее значение времени, соответствующее значению угловой скорости в точке j , определяется при помощи следующего выражения:

$$\begin{aligned} t &= t + \Delta t_{\omega_j}, \\ t_{\omega_j} &= t + \Delta t_{\omega_j}, \\ \Delta t_{\omega_j} &= a_{\omega_j} \cdot t_c. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения средних значений (среднее арифметическое, гармоническое, квадратичное) угловой скорости на определенном участке нужно знать границы временных интервалов t_1, t_2 .

На рисунках 3 и 4 представлены графики изменения угловой скорости электропривода во времени с асинхронным электродвигателем АИР56А4У3 до и после фильтрации соответственно.

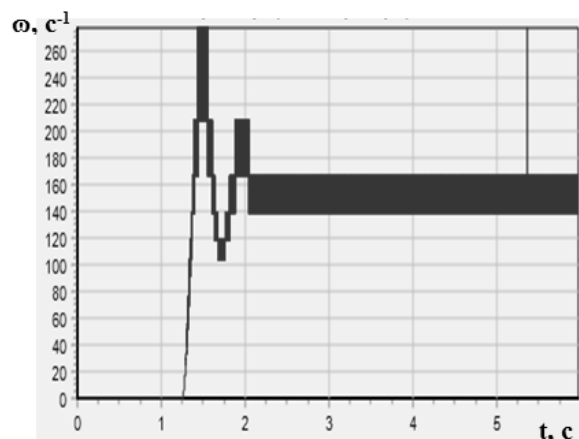


Рис. 3. График изменения угловой скорости без фильтрации

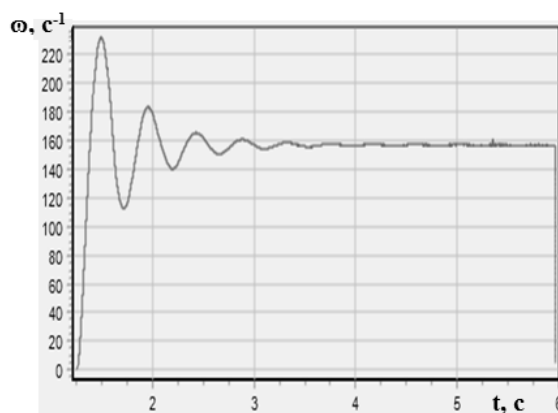


Рис. 4. График изменения угловой скорости с фильтрацией

Паспортные данные исследуемого асинхронного электродвигателя [11] представлены в таблице.

Паспортные данные асинхронного
электродвигателя АИР56А4У3

P_n , кВт	n_n , об/мин	I_n , А	η_n , %	$\cos \varphi_n$
0,12	1350	0,5	57	0,66
I_n / I_{n1}	M_n / M_{n1}	M_{max} / M_{n1}	J , кг·м ²	m , кг
5	2,2	2,2	0,0007	3,6

При расчете исследуемой угловой скорости при помощи соотношения (2) график переходного процесса получается кодированным (рис. 3) и потому требует осреднения для получения удовлетворительного представления исследуемой величины. Поэтому в предлагаемой методике используется осреднение при помощи расчета средних значений – среднего арифметического и среднего квадратичного.

Соответствующие расчетные соотношения для определения данных величин имеют следующий вид:

$$\omega_{\phi_j} = \frac{\omega_j + \omega_{j-1} + \omega_{j+1}}{3}, \quad (6)$$

$$\omega_{\phi_j} = \sqrt{\frac{\omega_j^2 + \omega_{j-1}^2 + \omega_{j+1}^2}{3}}. \quad (7)$$

Для расчета средних значений (среднее арифметическое, квадратичное, гармоническое) на определенном участке переходного процесса угловой скорости $[t_1; t_2]$ используются следующие формулы:

$$\omega_{\text{ср.ар.}t1t2} = \frac{S_{\text{ср.ар.}}}{N_{\text{ср.}}}, \quad (8)$$

$$\omega_{\text{ср.кв.}t1t2} = \sqrt{\frac{S_{\text{ср.кв.}}}{N_{\text{ср.}}}}, \quad (9)$$

$$\omega_{\text{ср.гарм.}t1t2} = \frac{N_{\text{ср.}}}{S_{\text{ср.гарм.}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{ср.}}$ – число осредняемых элементов массива угловой скорости.

Суммы среднеарифметического, среднеквадратичного, среднегармонического осреднения описываются выражениями

$$\begin{aligned} S_{\text{срар}} &= S_{\text{срар}} + \omega_{\phi_j}, \\ S_{\text{срква}} &= S_{\text{срква}} + \omega_{\phi_j}^2, \\ S_{\text{сргарм}} &= S_{\text{сргарм}} + 1/\omega_{\phi_j}. \end{aligned} \quad (11)$$

Массив значений текущего времени имеет вид

$$t_{\omega_j} = t + \Delta t_{\omega_j}. \quad (12)$$

Для снятия токовой характеристики используется датчик тока ACS712 20А. Данный датчик функционирует на основе эффекта Холла. Сбор информации с датчика тока осуществляется при помощи АЦП L-Card аналогично скорости.

Предварительно полученный график изменения тока без фильтрации во времени представлен на рис. 5.

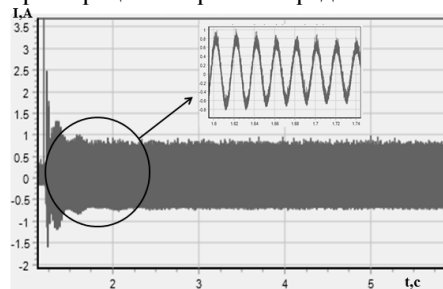


Рис. 5. График изменения тока без фильтрации

Однако исходный сигнал тока сильно зашумлен. Это объясняется пульсациями блока питания, «дрейфом нуля» датчика тока. Коэффициент датчика тока 100 мВ/А. При измерении малых токов выходной сигнал напряжения датчика соизмерим с помехами, поэтому наблюдается низкое качество выходного сигнала.

Для дальнейшей обработки токовой характеристики необходимо произвести ее фильтрацию. Современные осциллографы типа RIGOL позволяют производить фильтрацию зашумленного сигнала в режиме реального времени посредством его осреднения. Однако при большом числе итераций осреднения и большом числе данных осциллограф работает неэффективно.

Для получения токовой временной зависимости, ее обработки и анализа необходимо провести процедуру обработки получаемых значений от датчика тока. В этом случае массив данных токовой характеристики рассчитывается по формуле

$$i_{m_i} = K_{\text{от}} \cdot (b_{m_i} - \Delta U), \quad (13)$$

где b_{m_i} – двоичный массив данных из L-Card; $K_{\text{дт}}$ – коэффициент перевода выходного сигнала датчика тока из мВ в реальную величину в амперах; ΔU – коэффициент смещения линии опорного напряжения датчика тока ($\approx 2,5$ В) в начало координат, так как у датчика однополярное питание.

Осредненный массив токовой характеристики определяется выражением

$$i_{t_i} = \frac{i_{t_i} + i_{t_{i-1}} + i_{t_{i+1}}}{3}. \quad (14)$$

График изменения тока с фильтрацией во времени представлен на рис. 6.

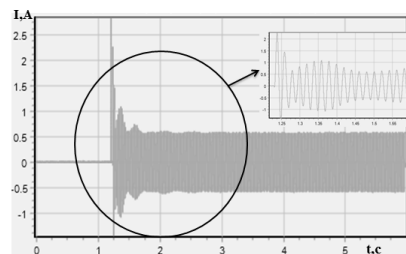


Рис. 6. График изменения тока с фильтрацией

Сбор и обработка необходимой информации для получения динамических скоростной и токовой характеристик двигателя осуществлялись на основе схемы подключений экспериментальной установки приведенной на рис. 7.

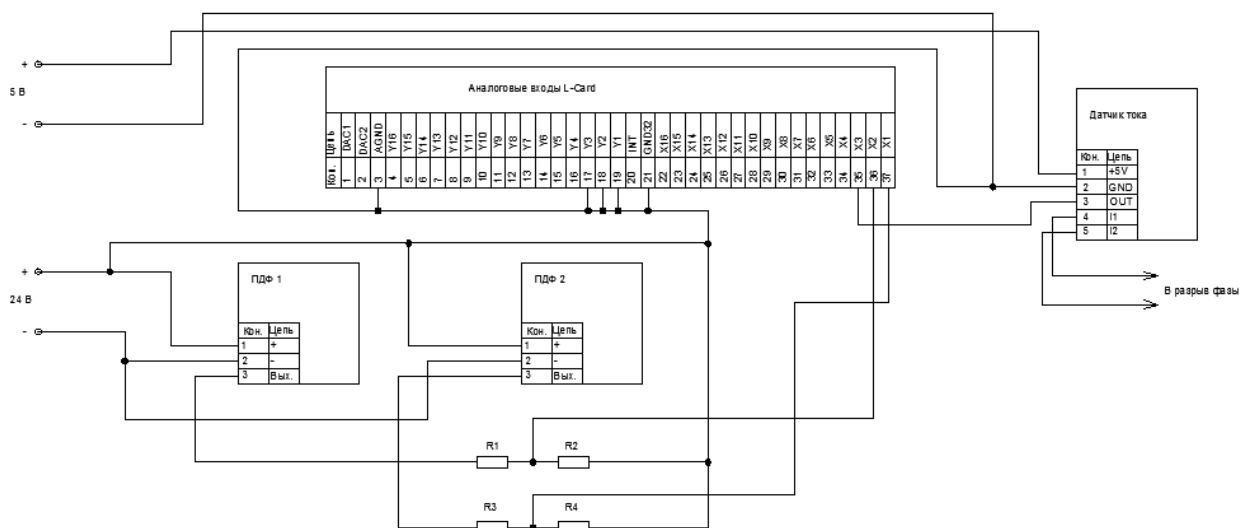


Рис. 7. Схема подключений экспериментальной установки

Для питания датчиков скорости (ПДФ1,2) используется постоянное напряжение 24 В, а датчика тока – 5 В. Так как максимальное входное напряжение L-Card 10 В, а выходное напряжение фотодатчиков типа ПДФ5 – 24 В, был разработан делитель напряжения, выполненный на резисторах R1-R4, для понижения выходного напряжения датчика скорости до 7 В.

Выводы

Таким образом, предложенные методики определения угловой скорости и тока позволяют в полном объеме использовать имеющиеся современные средства измерений и обработки получаемой информации (импульсный датчик скорости ПДФ5, АЦП L-Card 400 кГц, датчик тока ACS712), чтобы определять скоростные и токовые динамические характеристики асинхронного электропривода. В частности, анализ и обработка полученной информации в виде графиков динамических характеристик скорости и тока позволило для конкретного двигателя определить значения установившейся скорости электропривода на холостом ходу ($\omega_{xx}=155 \text{ c}^{-1}$), ему соответствующее значение тока холостого хода ($I_{xx}=0,4 \text{ A}$), которое было подтверждено показаниями амперметра высокого класса точности, а также время пуска ($t_p=0,7 \text{ c}$).

Рассмотренный метод осреднения массива данных тока позволяет получить практически идеальную синусоиду тока.

Список использованной литературы

1. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – М. : Энергия, 1977. – 432 с.
2. Кухарчук В. В. Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин / В. В. Кухарчук – Вінниця : «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1998 – 125 с.
3. Kennel R.M., (2006), Why do Incremental Encoders do a Reasonable Good job in Electrical Drives with Digital Control, *Proceedings of the 41st IEEE Indus-*

try Applications Society Annual Meeting, Tampa, FL, USA, Vol. 2, October 8-12 2006, pp. 925 – 930.

4. Petrella R., Tursini M., Peretti L., and Zigliotto M., (2007), Speed Measurement Algorithms for Low-resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis, (2007, September), *Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP'07. International Aegean Conference on IEEE*, pp. 780 –787, url: <http://sci-hub.bz/e59355bf6a2134df832c9b32443db4ad/petrella2007.pdf>

5. Petrella R., and Tursini M., (2008), An Embedded System for Position and Speed Measurement Adopting Incremental Encoders Industry Applications, *IEEE Transactions on*, 44(5), pp. 1436 – 1444.

6. Kavanagh R.C., (2000), Improved Digital Tachometer with Reduced Sensitivity to Sensor Nonideality Industrial Electronics, *IEEE Transactions on*, 47 (4), pp. 890 – 897.

7. Arabaci H., and Bilgin O., (2012), A Novel Motor Speed Calculation Method using Square wave Speed Sensor Signals via fast Fourier Transform, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20, pp. 1090 – 1099, doi: 10.3906/elk-1102-1038.

8. Квашнин В. О. Методика аналитического определения характеристик асинхронного двигателя / В. О. Квашнин // Проблемы создания новых машин и технологий. – 2000. – КГПИ-2000. – Вып. 8. – С. 143 – 145.

9. Квашнин В. О. Методика определения динамических скоростных характеристик асинхронных электродвигателей / В. О. Квашнин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2001. – Хмельницький : – Вип. № 8 (2001). – С. 137-141

10. Квашнин В.О. Модернизация методики определения динамической скорости электропривода / В. О. Квашнин, И. И. Полупан. // Вісник Національного технічного університету – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – С. 235-239

11. Кравчик А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.

Получено 10.05.2015

References

1. Veshenevskiy S.N. Harakteristiki dvigateley v elektroprivode [Characteristics of Motors in the Electrical Drive], (1977), 6-e izd. ispravlennoe, Moscow, Russian Federation, *Energy*, 432 p. (In Russian)

2. Kuharchyk V.V. Elementi teorii kontrolyu dinamichnih parametriv elektrichnih mashin (monografiya) [Elements of Electrical Machines Dynamic Parameters Control theory], (1998), Monograph, Vinnitsa, Ukraine, *Universum-Vinnitsa*, 125 p. (In Ukrainian)

3. Kennel R.M., (2006), Why do Incremental Encoders do a Reasonable Good job in Electrical Drives with Digital Control, *Proceedings of the 41st IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Tampa, FL, USA*, Vol. 2, October 8-12, , pp. 925 – 930 (In English).

4. Petrella R., Tursini M., Peretti L., and Zigliotto M., (2007), Speed Measurement Algorithms for Low-resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis, (2007, September), *Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP'07. International Aegean Conference on IEEE*, pp. 780 – 787, url: <http://sci-hub.bz/e59355bf6a2134df832c9b32443db4ad/petrella2007.pdf> (In English).

5. Petrella R., and Tursini M., (2008), An Embedded System for Position and Speed Measurement Adopting Incremental Encoders, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 44(5), pp. 1436 – 1444 (In English).

6. Kavanagh R.C., (2000), Improved Digital Tachometer with Reduced Sensitivity to Sensor Nonideality, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 47 (4), pp. 890 – 897 (In English)

7. Arabaci H., and Bilgin O., (2012), A Novel Motor Speed Calculation Method using Square wave Speed Sensor Signals via fast Fourier Transform, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20, pp. 1090 – 1099, doi: 10.3906/elk-1102-1038 (In English).

8. Kvashnin V.O. Metodika analiticheskogo opredeleniya harakteristik asinhronnogo dvigatelya [Methodology of Analytical Determining of Static Characteristics of Induction Motor], (2000), *Problemi Stozdaniya Novih Mashin i Tehnologiy – zb. npr.: Kremenchugskiy Gosudarstvenniy Politehnicheskiy Universitet: KGPI-2000.-vip*, No. 8, pp. 143 – 145 (In Russian).

9. Kvashnin V.O. Metodika opredeleniya dinamicheskikh skorostnih harakteristik asinhronnih elektrodvigateley, [Methodology of Determining of Dynamic Rotary Speed Characteristics of Induction Motor], (2001),

Vimiruvanna ta Obchisluvanna Tehnika v Tehnologichnih Prochessah. Chmel'nic'kiy, Khmel'nic'kiy, Ukraine, Vip. 8 (2001) , pp. 137-141 (In Russian).

10. Kvashnin V.O., and Polupan I.I. Modernizatsiya metodiki opredeleniya dinamicheskoy skorosti elektroprivoda [Rotary Speed Electrical Drive Method Modernization], (2008), *Visnik Natsionalnogo Tehnologicheskogo Universitetu "Harkivskiy Politehnichniy Institut"*, Harkiv, Ukraine, *NTU "HPI"*, pp. 235-239 (In Ukrainian).

11. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., and Sobolevskaya E.A., Asinhronnie dvigatelyi serii 4A. Spravochnik [Induction Motors Series 4A. Directory] (1982), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 380 p. (In Russian)



Квашнин
Валерий Олегович,
к.т.н. доц. каф. электромеханических систем автоматизации и электро-привода Донбасской государственной машиностроительной академии.
Тел. 0626416893,0509897701.
E-mail:
v.kvashnin@mail.ru



Бабаш
Андрей Владиславович,
аспирант каф. электромеханических систем автоматизации и электропривода Донбасской государственной машиностроительной академии.
Тел. 0955380417.
E-mail:
babashandrey@gmail.com