

УДК 62.83

О. И. Толочко, д-р техн. наук,
П. И. Розкаряка, канд. техн. наук,
И. О. Журов

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ СТАТОРА

Аннотация. Проанализированы различные подходы к моделированию обрыва фазы статора асинхронного двигателя во время его работы. Выявлены особенности тех или иных моделей асинхронного двигателя, а также даны рекомендации по их выбору для исследования неполнофазных режимов их работы.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обрыв фазы, математическая модель, неполнофазный режим работы, нулевая точка, схемотехническая модель

O. Tolochko, ScD.,
P. Rozkaryaka, PhD.,
I. Zhurov

MODELING THE INDUCTION MOTOR IN CASE OF LOSS OF STATOR PHASE

Abstract. Different approaches for modeling phase loss stator of the induction motor during operation are analyzed. The features of the different models of induction motor are revealed and recommendations for their choice to explore an open-phase mode are given.

Keywords: induction motor, loss of phase, mathematical model, open-phase mode, null point, circuit model

О. И. Толочко, д-р техн. наук,
П. И. Розкаряка, канд. техн. наук,
И. О. Журов

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ РОЗРИВІ ФАЗИ СТАТОРА

Анотація. Проаналізовані різні підходи до моделювання розриву фазы статора асинхронного двигуна під час його роботи. Виявлені особливості тих чи інших моделей асинхронного двигуна, а також дані рекомендації щодо їх вибору для дослідження неповно фазних режимів їх роботи.

Ключові слова: асинхронний двигун, розрив фазы, математична модель, неповнофазний режим роботи, нульова точка, схемотехнічна модель

Введение. При работе асинхронного двигателя могут возникнуть различные ситуации, приводящие к аварийным режимам его работы. Одним из часто встречающихся аварийных режимов для АД является обрыв фазы статора, вследствие чего двигатель переходит в неполнофазный режим работы.

Такой режим является частным случаем работы АД при питании несимметричным напряжением, в результате чего возникают напряжения, токи и потокоцепления прямой и обратной последовательности. При этом в сигнале электромагнитного момента двигателя возникают колебания с частотой, равной удвоенной частоте напряжения питания $2\omega_s$.

Кроме того, ухудшаются и энергетические показатели двигателя. В частности, уменьшается критический момент двигателя, а вместе с ним и максимальная мощность, передаваемая на вал [1, 2, 3].

Ввиду возможности возникновения такой аварийной ситуации, необходимо принимать меры по ее устранению.

Однако для того, чтобы добиться полного или частичного устранения данной проблемы средствами системы управления, необходимо иметь математическое описание АД, работающего в неполнофазном режиме.

Поэтому исследование работы АД при оборванной фазе статора методом математического моделирования является актуальной задачей.

Цель статьи: проанализировать различные способы моделирования работы АД при обрыве фазы статора и определить наиболее универсальный вариант модели для исследования данного режима.

Материалы исследования. Некоторые варианты математических моделей неполнофазного АД приведены в работах [4, 5, 6]. Математическое описание приводится в системах координат α, β и d, q , для перехода в которую необходимо выполнить координатные преобразования. Достоинством данных моделей является простота математического описания, полученного путем проведения аналогии с двухфазным асинхронным двигателем [7]. Однако все эти модели не позволяют учесть обрыв фазы статора в произвольный момент времени, а при подаче напряжения имитируют разгон двигателя уже в неполнофазном режиме, что является их недостатком.

Альтернативой при моделировании неполнофазного режима также может служить модель АД из библиотеки *SimPowerSystems* пакета *MATLAB* (блок *Asynchronous Machine SI(PU) Units*). При этом одна из фаз сети соединяется с фазой двигателя через блок *Breaker*, управляемый блоком *Step* (рис. 1).

Данная модель имитирует процесс прямого пуска АД (разгон до скорости холостого хода без нагруз-

ки) с последующим обрывом фазы С статора в момент времени 0,16 с на участке его работы с установившейся скоростью, как показано на рис. 2. Для исследования выбран АД типа МТК-11-6.

Как видно из приведенных графиков, обрыв фазы статора приводит к тому, что токи в оставшихся фазах увеличиваются в амплитуде, а фазовый сдвиг между ними становится равным 180°, т.е. токи находятся в противофазе. Сигнал момента обрывает синусоидальную форму, при этом период его колебаний вдвое меньше периода колебаний питающего напряжения.

Следует отметить, что в основу такой модели АД заложено математическое описание, учитывающее соединение обмоток статора в «звезду» без нулевого провода.

Другой вариант моделирования обрыва фазы двигателя возможен с использованием математической модели АД в естественных трехфазных координатах *A, B, C* статора и *a, b, c* ротора [8]. При использовании такой модели обрыв фазы статора может быть учтен резким увеличением сопротивления обрываемой фазы до очень большой величины, имитируя тем самым разрыв цепи (обнуление тока).

На рис. 3 показан фрагмент векторной модели АД, в котором выполняется формирование токов статора и ротора. Здесь векторный сигнал токов умножается на диагональную матрицу сопротивлений. Результирующий сигнал на выходе блока *Rsr* поступает на блоки *Normal Mode* и *Faulty Mode*. Посредством блока *Switch* выполняется переключение между нормальным режимом работы двигателя и режимом с оборванной фазой *C* статора.

Такая модель АД основывается на предположении о том, что все фазные величины (напряжения, токи, потокосцепления) сдвинуты во времени и пространстве на 120°.

Иными словами, в математическом описании данной модели отсутствуют уравнения, предполагающие соединение обмоток двигателя в «звезду» без нулевого провода:

$$I_{sA} + I_{sB} + I_{sC} = 0.$$

Как видно из графиков переходных процессов (рис. 4), в случае с нулевым проводом токи в исправных фазах двигателя остаются сдвинутыми на 120°, а амплитуда колебаний в сигнале электромагнитного момента значительно уменьшается.

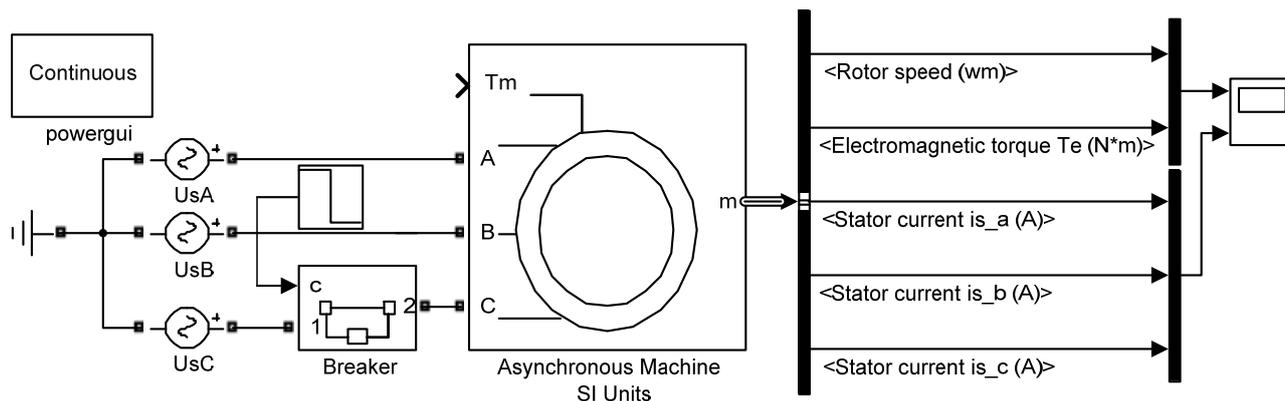


Рис. 1. Модель для исследования обрыва фазы статора асинхронного двигателя с использованием блока *Asynchronous Machine SI Units*

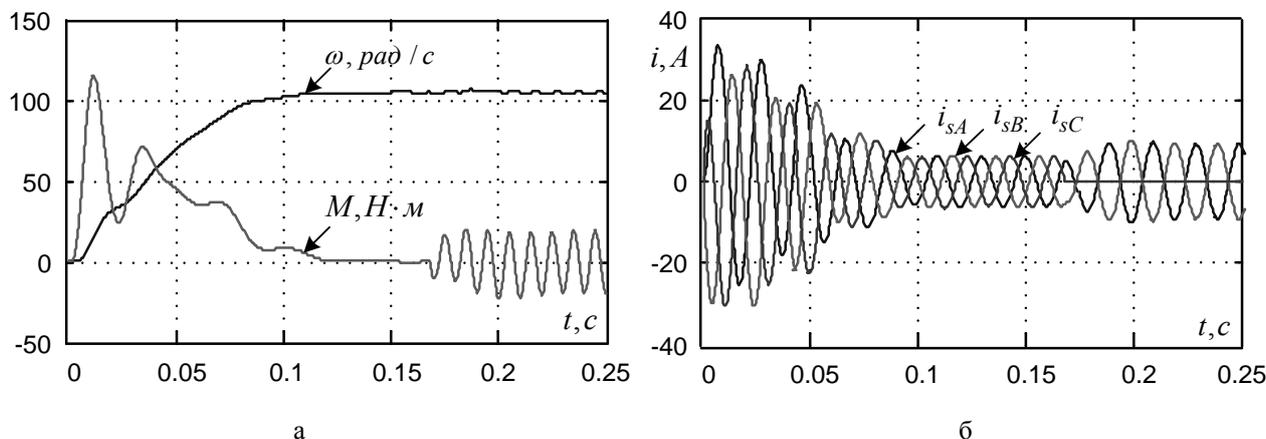


Рис. 2. Переходные процессы при прямом пуске АД и обрыве фазы С статора на установившейся скорости без нулевого провода: электромагнитный момент и скорость вращения (а), токи статора (б)

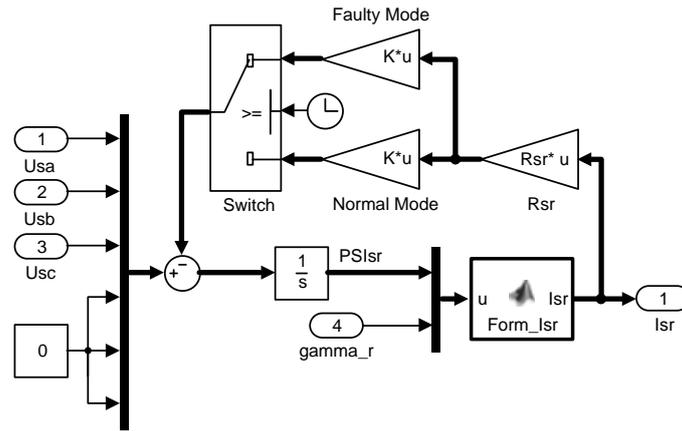


Рис. 3. Фрагмент векторной модели АД в естественных координатах

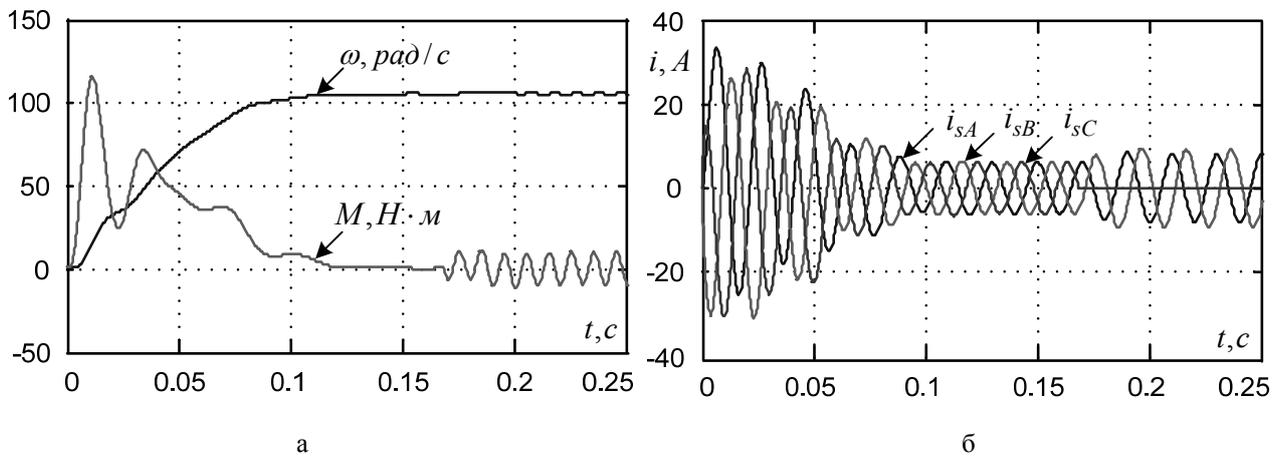


Рис. 4. Переходные процессы при прямом пуске АД и обрыве фазы С статора на установившейся скорости с нулевым проводом: электромагнитный момент и скорость вращения (а), токи статора (б)

Наиболее удобную для исследования работы АД в неполнофазном режиме модель можно получить с использованием подхода, предложенного в [9]. Здесь цепь статора представлена трехфазной активно-индуктивной нагрузкой, соединенной в «звезду». При этом каждая фаза статора состоит из последовательного включения активного сопротивления R_s , индуктивности σL_s и управляемого источника ЭДС. Оставшаяся часть уравнений двигателя решается в структурной части модели.

Приведем математическое описание данной модели АД. Уравнения электрического равновесия статорной и роторной цепей АД в векторно-матричной форме имеют вид [9, 10]:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = R_s \mathbf{I}_s + \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt}, \\ \mathbf{U}_r = R_r \mathbf{I}_r + \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Выражения для потокосцеплений статора и ротора связаны с токами соотношением

$$\mathbf{\Psi}_s = L_s \mathbf{I}_s + L_h \mathbf{C} \mathbf{I}_r, \quad (2)$$

$$\mathbf{\Psi}_r = L_h \mathbf{C}^T \mathbf{I}_s + L_r \mathbf{I}_r, \quad (3)$$

где $\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_r, \mathbf{I}_s, \mathbf{I}_r, \mathbf{\Psi}_s, \mathbf{\Psi}_r$ – векторы напряжений, токов и потокосцеплений статора и ротора соответственно, R_s, R_r, L_s, L_r – сопротивления и индуктивности статора и ротора соответственно, $L_h = 2/3 L_m$ – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора.

Из уравнения (3) можно выразить ток ротора

$$\mathbf{I}_r = (\mathbf{\Psi}_r - L_h \mathbf{C}^T \mathbf{I}_s) / L_r. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в соотношение (2), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{\Psi}_s &= L_s \mathbf{I}_s + L_h \mathbf{C} \mathbf{I}_r = \\ &= L_s \mathbf{I}_s + L_h / L_r \mathbf{C} (\mathbf{\Psi}_r - L_h \mathbf{C}^T \mathbf{I}_s). \end{aligned} \quad (5)$$

Для производной потокосцепления статора, исходя из уравнения (5), справедливо следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt} &= L_s \frac{d\mathbf{I}_s}{dt} - \frac{L_h}{L_r} \mathbf{S} \mathbf{\Psi}_r + \frac{L_h}{L_r} \mathbf{C} \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} - \\ &- \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d\mathbf{I}_s}{dt} = \sigma L_s \frac{d\mathbf{I}_s}{dt} + \frac{L_h}{L_r} \left(\mathbf{C} \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} - \mathbf{S} \mathbf{\Psi}_r \right). \end{aligned}$$

В приведенных уравнениях матрицы \mathbf{C} и \mathbf{S} формируются следующим образом:

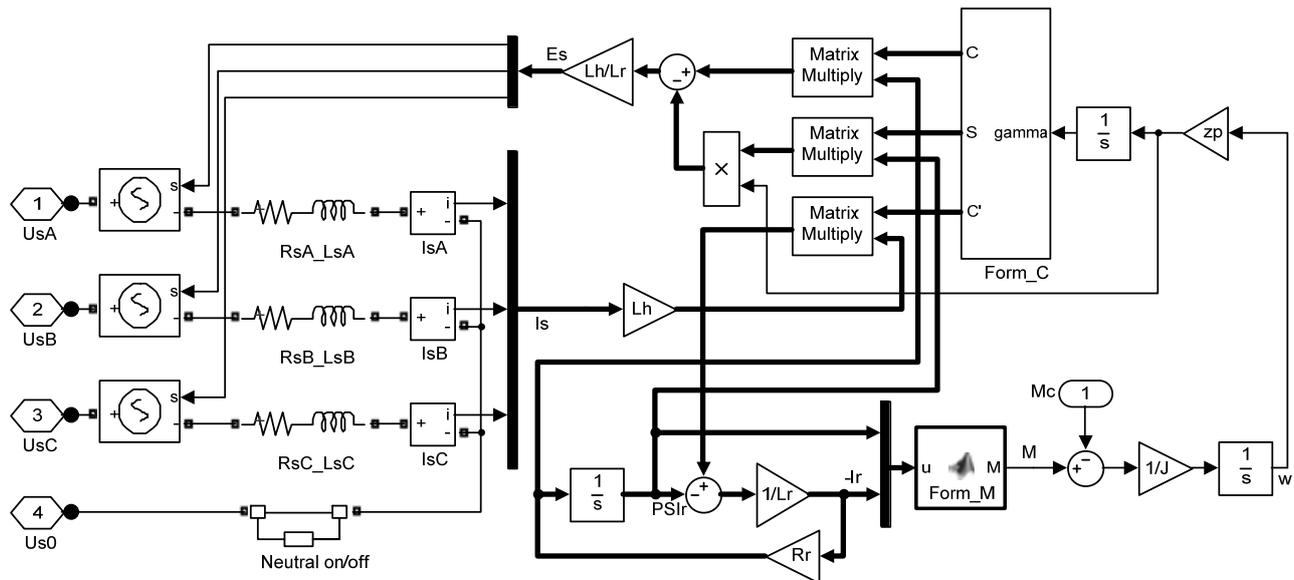


Рис. 5. Схематехническая модель асинхронного двигателя

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ s_3 & s_1 & s_2 \\ s_2 & s_3 & s_1 \end{bmatrix}, \quad \text{где элементы матриц } C \text{ и } S \text{ соответственно равны:}$$

$$c_1 = \cos \gamma_r, \quad c_2 = \cos \left(\gamma_r + \frac{2\pi}{3} \right), \quad c_3 = \cos \left(\gamma_r - \frac{2\pi}{3} \right), \quad s_1 = \sin \gamma_r, \\ s_2 = \sin \left(\gamma_r + \frac{2\pi}{3} \right), \quad s_3 = \sin \left(\gamma_r - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Подставляя выражение (6) в первое уравнение системы (1), получим

$$U_s = R_s I_s + \sigma L_s \frac{dI_s}{dt} + \frac{L_h}{L_r} \left(C \frac{d\Psi_r}{dt} - S \Psi_r \right). \quad (7)$$

Электромагнитный момент рассчитывается с помощью блока *Matlab Function*

$$M = \frac{z_p}{\sqrt{3}} I_r D \Psi_r, \quad (8)$$

где матрица $D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$.

Уравнение движения двигателя имеет вид:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (9)$$

На основании уравнений (3), (4), (7) – (9) составлена модель асинхронного двигателя, приведенная на рис. 5, которая позволяет исследовать электромеханические процессы, как при наличии, так и отсутствии нулевого провода между двигателем и сетью. Это достигается благодаря соединению обмоток статора двигателя в явном виде в схематехнической части модели.

Выводы. В статье рассмотрены разные варианты моделирования обрыва фазы статора АД. Предложена модель АД, позволяющая учитывать наличие нулевого провода между сетью и двигателем.

Результаты моделирования показывают, что наличие нулевого провода при работе асинхронного двигателя положительно сказывается на переходных процессах в случае обрыва какой-либо фазы статора, поскольку это способствует улучшению формы момента и скорости АД.

В дальнейшем предполагается продолжить исследования в направлении снижения пульсаций электромагнитного момента АД в системах регулируемого электропривода.

Список использованной литературы

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.: ил.
2. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. / И. П. Копылов – М. : Энергоиздат, 1986. – 360 с.: ил.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с., ил.
4. Jannati M.; Idris N.R.N., and Aziz M.J.A., (2013), A new Method for RFOC of Induction Motor under open-phase Fault, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE*, pp. 2530 – 2535.
5. Jannati M., Idris N.R.N., Salam Z., (2012), A New Method for Modeling and Vector Control of Unbalanced Induction Motors, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, pp. 3625 – 3632.
6. Jannati M., and Fallah E., (2010), Modeling and Vector Control of Unbalanced Induction Motors (Faulty Three Phase or Single Phase Induction Motors), *1st. Conference on Power Electronic & Drive Systems & Technologies (PEDSTC)*, May 2010, pp. 208 – 211.
7. Paul C. Krause, (1986), *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill,

8. Толочко О. І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB / О. І. Толочко, Г. С. Чекавський, Д. М. Мірошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199 – 202.

9. Шевченко І. С. Електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі: навч. посіб. / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. – Алчевськ : ДонДТУ, 2009. – 349 с.

10. Башарин А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с., ил.

Получено 08.07.2014

References

1. Kopylov I.P. Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin: Ucheb. dlya vuzov, [Mathematical Modeling of Electrical Machines: Textbook for High Schools], (2001), *Vysshaya Shkola*, Moscow, Russian Federation, 327 p. (In Russian).

2. Kopylov I.P. Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov, [Electrical Machines: Textbook for High Schools], (1986), *Energoizdat*, Moscow, Russian Federation, 360 p. (In Russian).

3. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov, [Electrical Machines: Textbook for High Schools], (1980), *Energia*, Moscow, Russian Federation, 928 p. (In Russian).

4. Jannati M., Idris N.R.N., and Aziz M.J.A., (2013), A new Method for RFOC of Induction Motor under Open-Phase Fault, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, pp. 2530 – 2535 (In English).

5. Jannati M., Idris N.R.N., and Salam Z., (2012), A new Method for Modeling and Vector Control of Unbalanced Induction Motors, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, pp. 3625 – 3632 (In English).

6. Jannati M., and Fallah E., (2010), Modeling and Vector Control of Unbalanced Induction Motors (Faulty three phase or Single Phase Induction Motors), *1st. Conference on Power Electronic & Drive Systems & Technologies (PEDSTC)*, May 2010, pp. 208 – 211 (In English).

7. Paul C. Krause, (1986), *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill (In English).

8. Tolochko O.I., Chekavs'kyi G.S., and Miroshnyk D.M. Vektorni modeli asynkhronnoho dvyhuna u sere-dovyshchi paketa MATLAB, [Vector Models of the Induction Motor in the Environment of MATLAB], (2003), *Visnyk Kremenchuts'koho Derzhavnoho Politekhnichnoho Universytetu: Naukovi Pratsi KDPU*, Kremenchuk, Ukraine, Vol.2/2003, pp. 199 – 202 (In Ukrainian).

9. Shevchenko I.S., and Morozov D.I. Elektromekhanichni protsesy v asynkhronnomu elektropryvodi, [Electromechanical Processes in Asynchronous Electric Drives], (2009), *DonDTU*, Alchevsk, Ukraine 349 p. (In Ukrainian).

10. Basharin A.V. Upravleniye elektroprivodami: Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Control of Electrical Drives: Textbook for High Schools], (1982), *Energoizdat*, Leningrad, Russian Federation, 392 p. (In Russian).



Толочко
Ольга Ивановна,
д-р техн. наук, проф., зав.
каф. электропривода и авто-
матизации промышленных
установок Донецкого нац.
технического ун-та.
Україна, г. Донецк, 83001,
ул. Артема, 58.
E-mail: tolochko_oi@mail.ru



Розкаряка
Павел Иванович,
канд. техн. наук, доц. каф.
электропривода и автомати-
зации промышленных уста-
новок Донецкого нац. техни-
ческого ун-та.
Україна, г. Донецк, 83001,
ул. Артема, 58.
E-mail: pavel_rozkar@mail.ru



Журов
Игорь Олегович, аспирант
каф. электропривода и авто-
матизации промышленных
установок Донецкого нац.
технического ун-та.
Україна, г. Донецк, 83001, ул.
Артема, 58.
E-mail: master_1@ukr.net