

УДК 621.313

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧАСТОТНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В СТЕРЖНЯХ РОТОРА В СРЕДЕ МАТЛАВ

Мельник А.А., ассистент

Донецкий национальный технический университет

83042, Донецк, ул. Ломоносова, 10а

E-mail: artyom2008@ukr.net

Розроблена математична модель короткозамкненого асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму в стрижнях ротора для використання в складі частотно-регульованого привода промислових механізмів. Реалізована математична модель в структурних блоках пакету Matlab/Simulink, яка дозволяє використовувати її для проведення наукових досліджень і вирішення практичних задач.

Ключові слова: числове моделювання, короткозамкнений асинхронний двигун, витіснення струму, частотно-регульований привод.

There was developed a mathematical model of the short-circuited asynchronous motor taking into account the current displacement effect in the rotor rods to be used as a part of a frequency adjustable speed drive of the industrial devices. There was implemented a mathematical model in the structural units of the Matlab package, allowing to use it for scientific researching and solving of the practical problems.

Key words: numerical simulation, short-circuited asynchronous motor, current displacement effect, and frequency adjustable speed drive.

Введение. Совершенствование современного парка вычислительной техники, стремительный рост производительности персональных компьютеров позволяет, как расширять круг решаемых пользователем задач, так и усложнять конкретные задачи. В данном контексте инженерные и научные задачи приобретают изящные и многообразные формы решений. В руках исследователя находится мощный и в то же время гибкий инструмент для разрешения актуальных научно-исследовательских и практических задач.

Среди основных задач в области моделирования электротехнических устройств и процессов на сегодняшний день является отказ от принимаемых ранее допущений, пренебрежения физическими процессами, протекающими в реальных устройствах и аппаратах. К одному из таких допущений следует отнести эффект вытеснения тока в стержнях ротора асинхронного двигателя.

В работе рассматривается моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя с учетом изменения величин активного и реактивного сопротивлений обмотки ротора в переходных режимах. Модель подготовлена для использования в составе более сложных моделей частотно-регулируемого привода.

Анализ предыдущих исследований. Большое число работ посвящено реализации указанного явления в различных пакетах моделирования. Работа [1] предлагает простое решение для учета эффекта вытеснения тока в стержнях асинхронной машины в структурных блоках пакета Matlab/Simulink, од-

нако не содержит рекомендаций по работе асинхронной машины в составе частотно-регулируемого привода. В работе [2] предложено учитывать ряд физических явлений, присутствием которых ранее пренебрегали, среди которых и эффект вытеснения, что позволило максимально приблизить результаты численного моделирования к натурному, однако работа выполнена для асинхронного двигателя без учета особенностей работы в составе частотно-регулируемого привода и реализована в среде пакета MathCAD.

Цель работы. Разработать математическую модель короткозамкнутого асинхронного двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора и реализовать последнюю в структурных блоках пакета Matlab/Simulink для работы в составе частотно-регулируемого привода.

Материал и результаты исследования. Исследование режима пуска асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого привода может быть осуществлено с использованием численного моделирования в пакете Matlab/Simulink.

Задача учета эффекта вытеснения тока может быть успешно решена, если будем полагать известными зависимости $R_2=f(s)$ и $X_2=f(s)$ при частоте питающей сети $f_1=50$ Гц (рис. 1) полученные экспериментальным путем.

Имеющиеся массивы данных следует аппроксимировать полиномом вида:

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1} \cdot \quad (1)$$

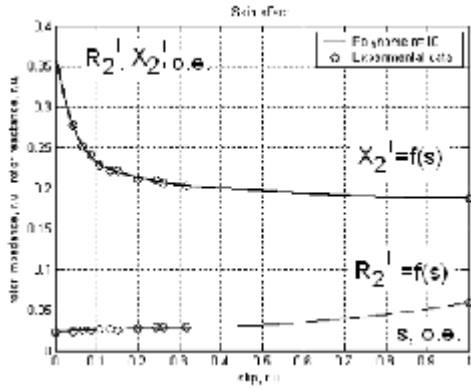


Рисунок 1 – Экспериментальные данные $R_2=f(s)$ и $X_2=f(s)$ при частоте питающей сети $f_1=50$ Гц (точки) и аппроксимирующие их зависимости (линия) в относительных единицах

В отличие от работы [1] необходимо соотнести значения R_2 и X_2 со скольжением во всем возможном диапазоне изменения последнего, включая переходные режимы рис. 2.

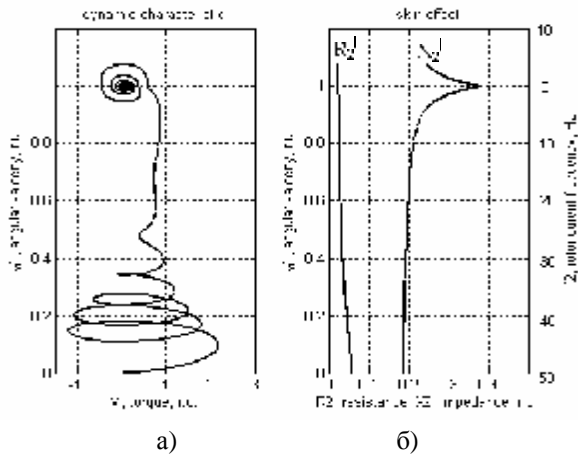


Рисунок 2 – Динамическая механическая характеристика (а) и соответствующие ее координатам значения активного и реактивного сопротивлений ротора (б)

Необходимо обратить внимание на особенности электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе в динамике. В первый момент времени, после подключения обмоток статора к источнику напряжения, поле статора вращается с частотой $n_1=60f_1/p$, а ротор, и, следовательно, его проводники неподвижны, а значит, движутся в направлении n_2 относительно вращающегося поля статора. В проводниках ротора наводится ЭДС и возникает ток, направленный в соответствии с рис. 5, а). На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, таким образом, имеем пару сил F_1 и F_2 , создающих электромагнитный момент.

Под действием электромагнитного момента ротор машины разгоняется до скорости, превышающей синхронную. Ток ротора отстает по фазе от напряжения, поскольку роторная цепь обладает ин-

дуктивностью, поэтому при достижении синхронной скорости в обмотках ротора все еще протекает ток, как это показано на рис. 3.

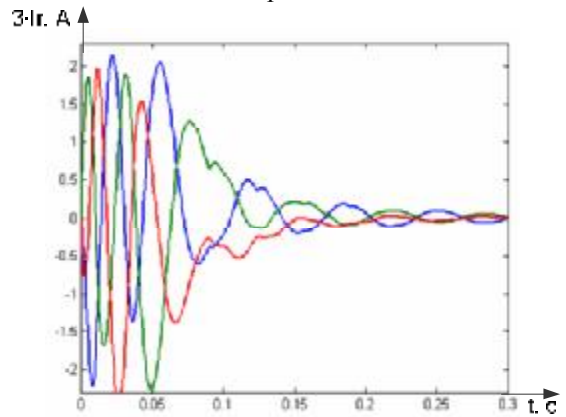


Рисунок 3 – Ток в роторе АД при пуске (три фазы)

Поскольку ток все еще протекает в обмотке ротора, продолжает создаваться электромагнитный момент, под действием которого машина продолжает разгоняться до скорости превышающей синхронную рис. 4.

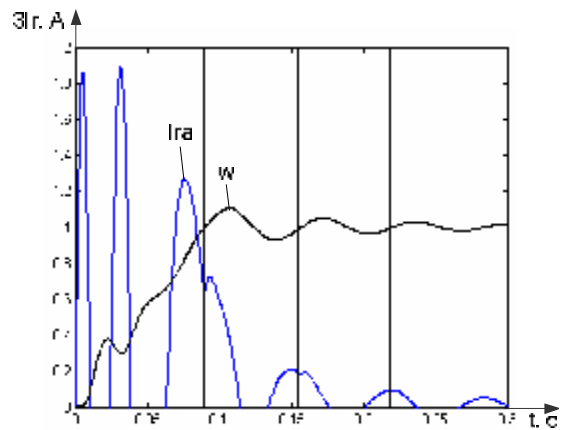


Рисунок 4 – Совмещенные зависимости тока приведенной фазы ротора и угловая частота вращения

Для случая, когда ротор вращается быстрее поля статора, относительно последнего он движется в направлении n_2 , как это показано на рис.5, б). Согласно правилу правой руки обозначим направление ЭДС ротора, следует заметить, что оно имеет противоположный знак по отношению к ЭДС в проводниках ротора, изображенного на рис. 5, а). Ток, которым нагружена обмотка ротора, меняет свой знак, что наглядно иллюстрирует рис. 4. Меняет направление сила, действующая на проводник с током, помещенным в магнитное поле. Электромагнитный момент также изменяет свой знак, что приводит к замедлению ротора и снижению скорости последнего. Таким образом, имеет место затухающий переходный процесс, выраженный в колебаниях скорости около точки установившейся работы.

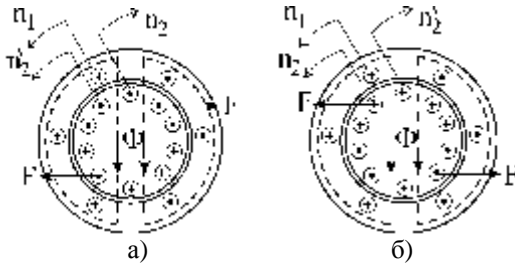


Рисунок 5 – Фізическі процеси в асинхронній машині при пуску (а) і при разгоні машини сверх скорости идеального холостого хода (б)

Исходя из вышеизложенного, примем зеркальное отражение функции (1) для области значения скорости сверх скорости идеального холостого хода, что не противоречит физическим процессам, имеющим место в обмотке ротора в динамике, как было показано выше.

Выбор координатных осей для обмотки статора для моделирования поведения машины переменного тока не является однозначным. С одной стороны, чтобы получить дифференциальные уравнения равновесия напряжений с постоянными коэффициентами при неизвестных, рекомендуют применять такую ортогональную систему координатных осей, в которой преобразованные контуры обмоток статора и ротора взаимно неподвижны. С другой стороны, для учета явления эффекта вытеснения тока необходимо выполнять подстановку значений (1), соответствующих текущему значению скольжения на каждом шаге численного интегрирования, что возможно только для трехфазной системы координат [3].

С учетом вышеизложенного, запишем основные уравнения в матричном виде:

$$\begin{cases} U_s = R_s \cdot I_s + \frac{d}{dt} \Psi_s; \\ U_r = R_r(s) \cdot I_r + \frac{d}{dt} \Psi_r; \\ I_0 = L_0^{-1} \Psi_0; \\ M = z_p I_r^T D \Psi_r; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_C, \end{cases} \quad (2)$$

где $U_s, I_s, \Psi_s, U_r, I_r, \Psi_r$ – векторы напряжений токов и потокосцеплений фаз А, В, С статора и а, b, с ротора; R_s – матрица активных сопротивлений фаз статора; $R_r(s)$ – матрица активных сопротивлений фаз ротора приведенных к статору, соответствующих текущему значению скольжения; I_0, Ψ_0 – объединенные векторы токов и потоков (статора и ротора).

Модель исследуемой системы, записанная согласно (2), в структурных блоках пакета Matlab/Simulink имеет вид, представленный на рис. 6. Для работы модели необходимо использовать пять функций пользователя, опуская листинги,

укажем назначение функций в табл. 1.

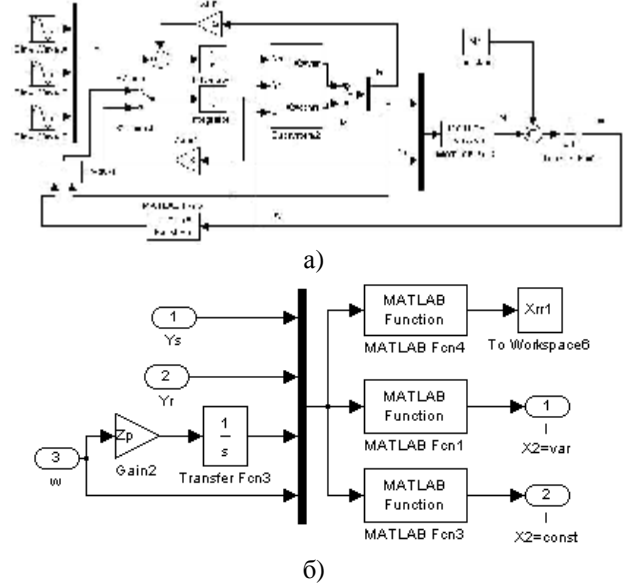


Рисунок 6 – Математическая модель асинхронного двигателя в естественной системе координат с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора: а) подпрограмма Subsystem; б) в структурных блоках пакета Matlab/Simulink

Принятая к исследованию система координат является громоздкой с точки зрения ее математического описания, содержит большое число нелинейных элементов и требует промежуточного решения системы линейных уравнений для получения значений токов обмоток. Отмеченный недостаток может быть компенсирован повышением производительности персонального компьютера, на котором производится решение задачи или же применением ускоренного алгоритма симуляции Accelerator встроенного в пакет Matlab.

Таблица 1 – Сведенные данные о функциях пользователя в составе математической модели

Название функции пользователя/блок	Назначение
function1(u) блок MATLAB Fcn1	Решение системы линейных уравнений для вычисления значений токов с учетом изменения реактивного сопротивления X_2^1 для текущего значения скольжения
function2(u) блок MATLAB Fcn2	Вычисление электромагнитного момента
functionR(u) блок MATLAB Fcn3 и functionX(u) блок MATLAB Fcn4	Вычисление значения активного R_2^1 и реактивного X_2^1 сопротивлений для текущего значения скольжения
function10(u) блок MATLAB Fcn5	То же, что и function1(u) без учета вытеснения для анализа влияния последнего

Предложена модель, прежде всего, позволяет оперировать с истинными значениями активного R_2^l и реактивного X_2^l сопротивлений для текущего значения скольжения при заданных величине и частоте питающего напряжения, что существенно приближает значения вычислительного эксперимента натурному, кроме того, такая модель позволила исследователю уточнить значения максимального момента и критического скольжения при работе на искусственных характеристиках для заданного закона частотного регулирования.

Для дальнейшего исследования положим закон частотного регулирования $U/f=\text{const}$. Известная работа [4] предлагает для получения значений критического момента на любой искусственной характеристике для жесткой сети выражение:

$$M_{\text{кр}}(\alpha) = \frac{3 \cdot U_{\text{ИФ}}^2 \cdot \gamma}{2 \cdot \omega_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{1}{r_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ИФ}}$ – номинальное значение напряжения обмотки двигателя; $\omega_{\text{НОМ}}$ – номинальное значение угловой частоты вращения; $\gamma = U_1/U_{\text{ИНОМ}}$ – относительное напряжение на статоре; $\alpha = f_1/f_{\text{ИНОМ}}$ – относительная частота напряжения (тока) статора;

$\tau_1=x_1/x_0$ – коэффициент рассеяния статора; $\tau_2=x_2'/x_0$ – коэффициент рассеяния ротора; $\tau=\tau_1+\tau_2$; $\tau_1 \tau_2$ – общий коэффициент рассеяния; $b=R_1(1+\tau_2)$, $c=x_0 \tau$, $d=R_1/x_0$, $e=1+\tau_1$ – коэффициенты.

Уточним результат расчета по известной формуле (3) на основании многократного вычислительного эксперимента на математической модели (2).

Моделирование процесса частотного пуска асинхронного двигателя. Вычислительный эксперимент включал в себя такую последовательность режимов работы: пуск на фиксированной частоте сети, закон $U/f=\text{const}$, нагружение исследуемой машины до ее опрокидывания. В ходе вычислительного эксперимента на предложенной модели, для асинхронной машины мощностью 45 кВт получены динамические механические характеристики (рис. 7) для постоянных значений R_2^l и X_2^l , и уточненные динамические механические характеристики (рис. 8) для изменяющихся значений $R_2^l=f(s)$ и $X_2^l=f(s)$. Полученные динамические механические характеристики позволяют уточнить значения критического момента и критического скольжения для закона $U/f=\text{const}$. Результаты сведены в табл. 2.

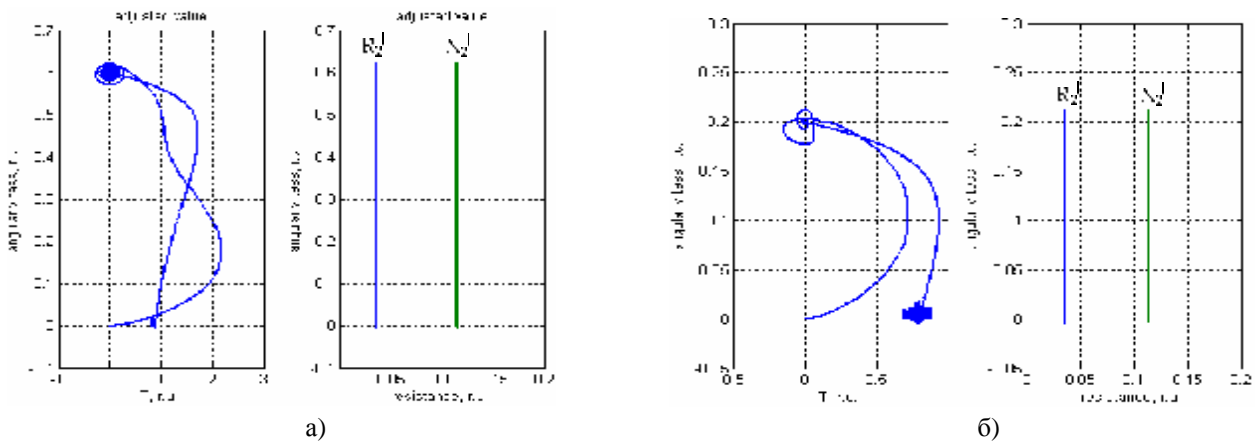


Рисунок 7 – Динамические механические характеристики асинхронного двигателя при работе от сети частотой питающего напряжения $f_1=30$ Гц (а), $f_1=10$ Гц (б) для постоянных значений R_2^l и X_2^l (напряжение изменяется соответственно закону $U/f=\text{const}$)

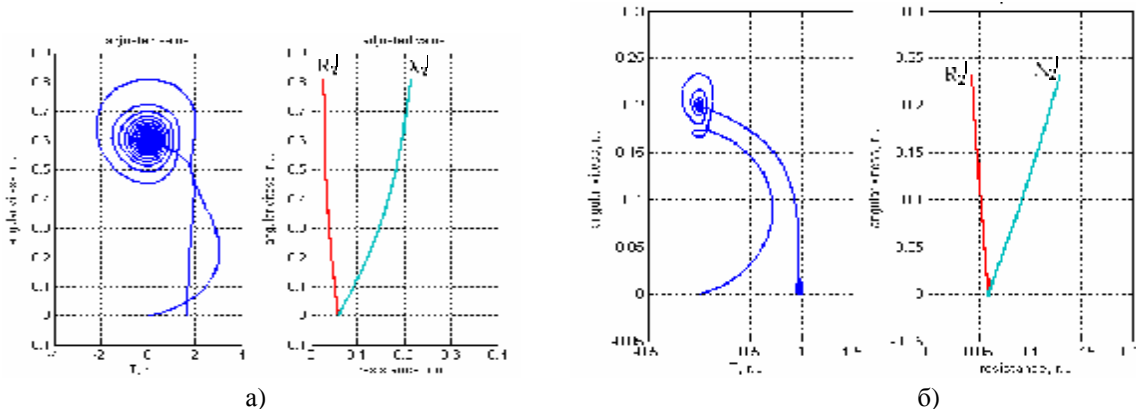


Рисунок 8 – Динамические механические характеристики асинхронного двигателя при работе от сети частотой питающего напряжения $f_1=30$ Гц (а), $f_1=10$ Гц (б) с учетом изменяющихся значений $R_2^l=f(s)$ и $X_2^l=f(s)$ (напряжение изменяется соответственно закону $U/f=\text{const}$)

Таблиця 2 - Результати вычислительного эксперимента

f_1/f_{1H} (закон $U/f=\text{const}$)		0,2	0,4	0,6	0,8	1
$M_{кр}/M_H$	Кривая 3 - расчет по (3) $R_2^L=\text{const}, X_2^L=\text{const}$	0,57	1,07	1,46	1,77	2
	Кривая 1 - расчет по (2) $R_2^L=\text{const}, X_2^L=\text{const}$	0,94	1,45	1,73	1,87	2
	Кривая 2 - расчет по (2) $R_2^L=\text{var}, X_2^L=\text{var}$	1	1,65	2	2,15	2,16
$S_{кр}, \%$	Кривая 1 - при $R_2^L=\text{const}, X_2^L=\text{const}$	50	48	30	21,5	20
	Кривая 2 - при $R_2^L=\text{var}, X_2^L=\text{var}$	100	62,5	56,6	22,5	20

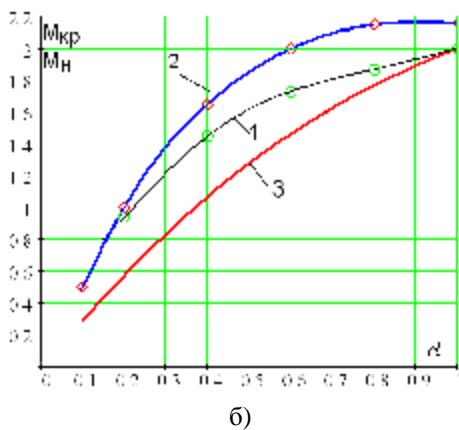
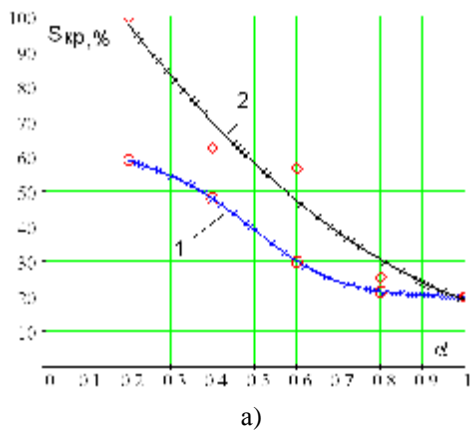


Рисунок 9 – Зависимость критического скольжения а) и кратности критического момента б) при частотном регулировании по закону $U/f=\text{const}$ при регулировании вниз от номинальной частоты

Выводы 1. Разработана математическая модель асинхронной машины с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора на основе экспериментально полученных зависимостей $R_2^L=f(s)$ и $X_2^L=f(s)$.

2. Разработанная математическая модель асинхронной машины может быть использована для моделирования частотно-регулируемого привода

для известных законов регулирования.

3. Приведенные примеры моделирования режимов работы частотно-регулируемой асинхронной машины подтверждают эффективность модели и адекватность полученных результатов реальным процессам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каваре Ясер Хусейн. Учет эффекта вытеснения тока в стержнях ротора асинхронного двигателя при его моделировании в среде Matlab // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Електротехніка і енергетика: Донецьк: ДонНТУ, 2003. – Вип. 67. – С.160-162.

2. Сивокобыленко В.Ф. Моделирование режимов работы асинхронных машин с учетом насыщения магнитных цепей и вытеснения токов в роторе. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Електротехніка і енергетика: Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 111. – С.10-16.

3. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделирование электромеханических систем: Підручник. – Кременук, 2001. – 376 с.

4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

5. Макаров К.Д., Акульшина Л.И., Гайдашева Л.Я., Городько О.Ю. О регулировании напряжения на зажимах частотно-регулируемого асинхронного двигателя. Взрывозащищенное электрооборудование // Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. – 320 с.

Стаття надійшла 20.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.