

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ANSYS MAXWELL RMXprt

*Александр Кириченко, Павел Полянский, Геннадий Иванов*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Ул. Парижской коммуны, 9, г. Николаев, Украина. E-mail: [askyrychenko@gmail.com](mailto:askyrychenko@gmail.com)*

*Olexandr Kyrychenko, Pavlo Polyansky, Gennadiy Ivanov*

*Nikolaev National Agrarian University*

*St. Paris Commune, 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: [askyrychenko@gmail.com](mailto:askyrychenko@gmail.com)*

**Аннотация.** В работе изложены результаты исследования в области проектирования и моделирования электрических машин для электротехнологий с использованием программного модуля Ansys Maxwell RMXprt. Данный программный модуль основан на аналитической теории электрических машин. В связи с этим, рассмотрены математические модели обобщенной асинхронной машины и асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, основанные на классической аналитической теории асинхронных машин. С использованием интерактивной параметризированной модели трехфазного индукционного двигателя выполнено моделирование асинхронного двигателя для электротехнологий.

Расчет асинхронного электродвигателя для электротехнологий проводился при следующих исходных данных: выходная мощность – 15 кВт, номинальное напряжение – 380 В, частота – 50 Гц, номинальная скорость вращения – 970 об/мин, потери мощности на трение – 150 Вт, паразитные потери – 750 Вт, рабочая температура – 75 °С.

Исходные расчетные параметры статора: число пазов – 60, внешний и внутренний диаметры соответственно – 340 и 205 мм, длина статора – 310 мм, тип стали M19\_24G. Форма пазов выбрана I-го типа со следующими геометрическими размерами:

$hs0 = 0,8$  мм;  $hs2 = 39,48$  мм;  $bs0 = 3$  мм;  
 $bs1 = 4,8$  мм;  $bs2 = 8,2$  мм.

Исходные расчетные параметры ротора: число пазов – 36, внутренний диаметр – 80 мм, длина ротора – 310 мм, тип стали M19\_24G. Форма пазов, также, выбрана I-го типа со следующими геометрическими размерами:  $hs0 = 0,5$  мм;  $hs2 = 14,34$  мм;  $bs0 = 1$  мм;  $bs1 = 3,3$  мм;  $bs2 = 3,3$  мм.

В результате получены рабочие характеристики смоделированного асинхронного электродвигателя для электротехнологий. Установлены основные рабочие параметры спроектированного электродвигателя: момент на валу  $M = 200$  Н·м, КПД  $\eta = 85$  %, фазный ток  $I = 45$  А, коэффициент мощности  $\cos(\varphi) = 0,8$ .

Проанализированы преимущества использования интерактивных параметризированных моделей программного модуля Ansys Maxwell RMXprt для проектирования электрических машин и анализа их рабочих характеристик.

**Ключевые слова:** индукционные механизмы, асинхронный двигатель, статор, ротор, программный модуль, рабочие характеристики.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Вопросы проектирования и моделирования асинхронных электродвигателей остаются весьма острыми, поскольку требования к рабочим характеристикам современных электродвигателей значительно возросли. Для решения подобных задач довольно часто используются системы автоматизированного проектирования, однако, большинство созданных в них моделей не являются интерактивными. В связи с этим, значительный интерес представляет использование новейших программных продуктов, в частности, программного модуля Ansys Maxwell RMXprt. Этот программный модуль является современным инструментом для проектирования и моделирования электрических машин различного типа. В Ansys Maxwell RMXprt встроены интерактивные параметризированные модели электрических машин, которые позволяют автоматически построить геометрию электромашины по введенным в программный модуль исходным данным. Кроме того, для смоделированной электрической машины одновременно можно получить ее основные рабочие характеристики, проанализировать их и, при необходимости, произвести расчет заново для достижения необходимой параметрической оптимизации.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проектирование и моделирование асинхронных электродвигателей в программном модуле Ansys Maxwell RMXprt должно основываться на предварительном обзоре работ, в которых рассмотрены современные и новейшие типы электродвигателей и требования, которые предъявляются к их рабочим характеристикам.

В работах [1, 20, 21] приведены сведения об устройстве и принципе действия трехфазных и однофазных асинхронных двигателей, о расчете характеристик и выборе мощности двигателей при их питании от трехфазной и однофазной сети, о расчете параметров и выборе пусковых и рабочих конденсаторов, о схемах управления и защиты и выборе элементов схем. Кроме того, представлены технические

данные о некоторых типах современных асинхронных двигателей и сведения о разработке новейших типов асинхронных энергосберегающих двигателей.

В [2, 3, 25] рассмотрен графический интерфейс программы Ansys, а также, на конкретных примерах показаны особенности создания моделей с использованием метода конечных элементов.

Системам управления электроприводов посвящены работы [4-6], в которых, помимо прочего, освещено влияние конструктивных параметров электрических машин на показатели качества управления.

Асинхронный электродвигатель в составе автоматизированного электропривода для энергоэффективной настройки топливотрегулирующей аппаратуры проанализирован в [7].

В работе [8] описана конечно-элементная программа Ansys, позволяющая проводить моделирование инженерных устройств, расчет которых сводится к анализу полей любой природы. Рассмотрены возможности программы Ansys по расчету магнитных систем постоянного и переменного тока в стационарном и нестационарном режимах, без учета нелинейной характеристики магнитного материала и с ее учетом. Даны конкретные примеры интерактивных и командных анализов в Ansys осесимметричной разомкнутой магнитной системы и магнитной системы с одним зазором при трехмерном поле.

Автоматизированное проектирование и моделирование систем управления асинхронными электроприводами изучено в [9, 10].

Результатом большого труда является работа [11], посвященная вопросам взаимозаменяемости, стандартизации и технических измерений, которые широко используются при проектировании и моделировании электрических машин.

Вопросы восстановления изношенных деталей методами газотермического напыления изложены в [12].

Повышению энергоэффективности работы электронасосных агрегатов, приводом которых являются асинхронные электродвигатели посвящены работы [13, 16, 17, 19, 22].

Анализ систем частотного управления для асинхронных электроприводов, вопросы дискретизации и z-форм рассмотрены в [14, 15, 18].

Основные требования, которые предъявляются к рабочим характеристикам современных асинхронных двигателей в составе частотно-регулируемых электроприводов переменного тока изложены в работах [23-25].

На основе проделанного анализа последних исследований и публикаций, можно перейти к рассмотрению задачи проектирования и моделирования асинхронных электрических машин.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей работы является моделирование асинхронного двигателя для электротехнологий с использованием программного модуля Ansys Maxwell RMxprt с целью получения его основных рабочих

характеристик: полезного момента, фазного тока и коэффициента мощности

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Обобщенная модель асинхронной машины показана на рис. 1. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах [9]. Решение уравнение для ЭДС на обмотках статора и ротора основывается на втором законе Кирхгофа.

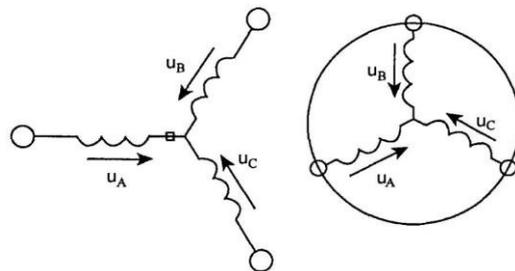


Рис. 1. Обобщенная асинхронная машина  
Fig. 1. General sheme of asynchronous machine

Для статора эти уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

В свою очередь, для ротора уравнения следующие:

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \\ u_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ u_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях (1)-(2) фигурируют мгновенные значения напряжений, токов и потокосцеплений статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполнены симметрично, поэтому  $R_A = R_B = R_C = R_S$  – активное сопротивление статорной обмотки,  $R_a = R_b = R_c = R_R$  – активное сопротивление роторной обмотки.

Другим законом, который используется является закон Ампера, который связывает потокосцепление обмоток с токами, которые протекают по этим обмоткам:

– для статора:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c, \\ \Psi_B = L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c, \\ \Psi_C = L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c. \end{cases} \quad (3)$$

– для ротора:

$$\begin{cases} \Psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c, \\ \Psi_b = L_{bA} i_A + L_{bB} i_B + L_{bC} i_C + L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c, \\ \Psi_c = L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_{cC} i_C + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c. \end{cases} \quad 21.$$

Симметричные уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление для каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках; эти зависимости проявляются через взаимную индукцию. В уравнениях (3)-(4)  $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все следующие – взаимные индуктивности между соответствующими обмотками.

Третьим законом, который лежит в основе анализа, является второй закон Ньютона – закон равновесия моментов на валу машины:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad (5)$$

где:  $J$  – момент инерции на валу машины, который учитывает как инерционность самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора,  $\omega_m$  – угловая скорость вала машины,  $M_H$  – момент рабочего механизма, который приведен к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота.

Наконец, четвертым и последним законом, который лежит в основе анализа машины, является закон, сформулированный Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и ротора.

$$\bar{M} = k (\bar{\psi} \times \bar{i}). \quad (6)$$

Необходимо отметить, что несмотря на полное и четкое математическое описание, использование уравнений (1)-(6) для исследования машины сопряжено с серьезными трудностями, а именно:

- в уравнениях (5)-(6) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (1)-(4) скалярные; количество взаимосвязанных уравнений равно 16, а количество коэффициентов 44;

- коэффициенты взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора в уравнениях (3)-(4) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, то есть уравнения (3)-(4) являются уравнениями с переменными коэффициентами;

- уравнение (6) является нелинейным, поскольку в нем перемножаются переменные.

На пути к упрощению математического описания асинхронной машины, как и вообще машин переменного тока служит метод пространственного вектора, который позволил существенно упростить и сократить приведенную выше систем уравнений; метод позволяет решить уравнения (1)-(6) в единой системе с векторными переменными состояниями. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Это математическое преобразование имеет вид (например, для тока статора):

$$\bar{i} = \frac{2}{3} (i_A \bar{a}_B - \bar{a}^2 i_C), \quad (7)$$

где:  $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  – векторы, которые учитывают пространственное размещение обмоток;  $i_{\bar{A}} = I \cos \omega t$ ,  $i_{\bar{B}} = I \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$ ,

$i_{\bar{C}} = I_m \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$  – трехфазная симметричная система токов статора.

Подставив в уравнение (7) значения мгновенных токов, найдем математическое описание пространственного вектора статорного тока:

$$\bar{i}_S = \frac{2}{3} I_m \left[ \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( \omega t \right) \right] = I_m e^{j\omega t}. \quad (8)$$

Аналогично пространственными векторами можно представить все напряжения, токи и потокосцепления, которые входят в уравнения (1)-(4). При этом удобно воспользоваться уравнениями в относительных величинах. Обобщенная система уравнения для описания асинхронной машины имеет вид:

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} - j\alpha_k \bar{\psi}_S, \\ \bar{u}_R = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - \rho v) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R, \\ m = k \text{Mod} (\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m - \frac{dv}{dt} = m - m_H. \end{cases} \quad (9)$$

В этих уравнениях все переменные относительные, они получены как результат деления реальных значений на базовые, все коэффициенты также безразмерны, их получают аналогично. Переменные и параметры в относительных единицах:

$$\bar{u} = \frac{u}{U_b}, \bar{i} = \frac{i}{I_b}, \bar{\psi} = \frac{\psi}{\psi_b} \quad \text{– относительные электромагнитные переменные состояния};$$

– относительные частота статора и относительная скорость ротора;

$$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, v = \frac{\omega_m}{\omega_b} \quad \text{– относительная частота статора и относительная скорость ротора};$$

– относительный момент на валу машины;

$$m = \frac{M}{M_b} \quad \text{– относительный момент на валу машины};$$

$$r = \frac{R_S}{R_b}, r_R = \frac{R_R}{R_b}, x_S = \frac{\omega_b L_S}{R_b}, x_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b},$$

$$x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}, \bar{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b} \quad \text{– относительные параметры.}$$

В уравнениях (9) время принято безразмерным  $t = \frac{t}{t_b} = \omega_b t$ , то единицей измерения времени является не секунда, а  $t_b = \frac{1}{\omega_b}$ . Следует отметить, что

– относительные частота статора и относительная скорость ротора;

введение относительных величин существенно сокращает час моделирования и позволяет устранить много проблем при моделировании.

Математическая модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором можно получить из обобщенной математической модели электрической машины [9, 24], если обмотки ротора замкнуты накоротко. При этом система общих уравнений при  $\bar{u}_R = 0$  примет вид:

$$\begin{cases} u_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} - j\alpha_k \bar{\psi}_S, \\ 0 = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\omega) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = k \text{Mod}(\bar{\psi}_S \times \bar{i}_R), \\ T_m - \frac{d\omega}{dt} = m - m_H. \end{cases} \quad (10)$$

Для динамических систем необходимо учесть переходные электромагнитные процессы в машине [2, 8]. В этом случае в качестве пары переменных, которые описывают машину, оставим пространственные векторы статора и потокосцепления ротора ( $\bar{i}_S, \bar{\psi}_R$ ), тогда уравнения (1) примут вид:

$$u_S = r_S \bar{i}_S + x'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\alpha_k x'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R p\omega \bar{\psi}_R \quad (11)$$

$$k_R r_R \bar{i}_S + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\omega) \bar{\psi}_R = 0, \quad (12)$$

$$m = k_R \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S) \quad (13)$$

$$T_m \frac{d\omega}{dt} = m - m_H, \quad (14)$$

$$\text{где: } r = \begin{pmatrix} r_S & k_R r_R \\ r_S & k_R r_R \end{pmatrix}; \quad x'_S = \begin{pmatrix} x_S & -x_m \\ x_S & x_R \end{pmatrix}, \quad k_R = \frac{x_m}{x_R},$$

$$T_R = \frac{x_R}{r_R} \quad \text{— безразмерные коэффициенты.}$$

Для того чтобы лучше понять физические процессы, которые происходят в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором, ее исследуют в различных системах координат. Для представления пространственных векторов удобно воспользоваться комплексной плоскостью. Уравнения (10)-(14) относятся к классической аналитической теории электрических машин, которая используется в программном модуле Ansys Maxwell RMxprt, который содержит множество параметризованных моделей.

Программный интерфейс Ansys Maxwell RMxprt показан на рис. 2, он содержит пять основных программных окон: Project Manager, Properties, Message Manager, Progress и самое большое графическое окно, которое расположено справа.

В программном окне Project Manager необходимо ввести параметры статора, ротора и общие параметры асинхронного электродвигателя. Например, для статора и ротора указываются их геометрические размеры, тип обмотки, тип материала и т.д. Перед запуском программного анализа электродвига-

теля, необходимо ввести его общие параметры, например, мощность, напряжение, рабочая температура, число полюсов, номинальная скорость, потери мощности.

Программный модуль Ansys Maxwell RMxprt предназначен для разработки и оптимизации вращающихся механизмов различного типа (рис. 3). В том числе, он представляет собой удобный инструмент для исследования индукционных механизмов, которые в данное время являются наиболее распространенными приводами различных устройств для электротехнологий. Смоделируем асинхронный двигатель для электротехнологических устройств, для этого в программном обеспечении Ansys Maxwell следует воспользоваться программным модулем Ansys Maxwell RMxprt с параметризованной моделью индукционных механизмов.

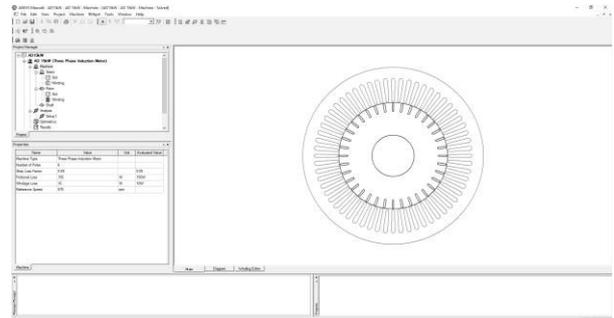


Рис. 2. Интерфейс программного модуля Ansys

Maxwell RMxprt с интерактивной моделью асинхронного двигателя

Fig. 2. Interface of Ansys Maxwell RMxprt program module with interactive model of induction motor

Удобство программного модуля Ansys Maxwell RMxprt состоит в том, что моделируемый асинхронный электродвигатель для электротехнологических устройств создается на интерактивной параметризованной модели. Подобная модель позволяет провести верификацию исходных данных на наличие ошибок, а также достаточность данных для проведения моделирования.

Геометрия асинхронного двигателя для электротехнологий создается одновременно с вводом соответствующих параметров статора и ротора.

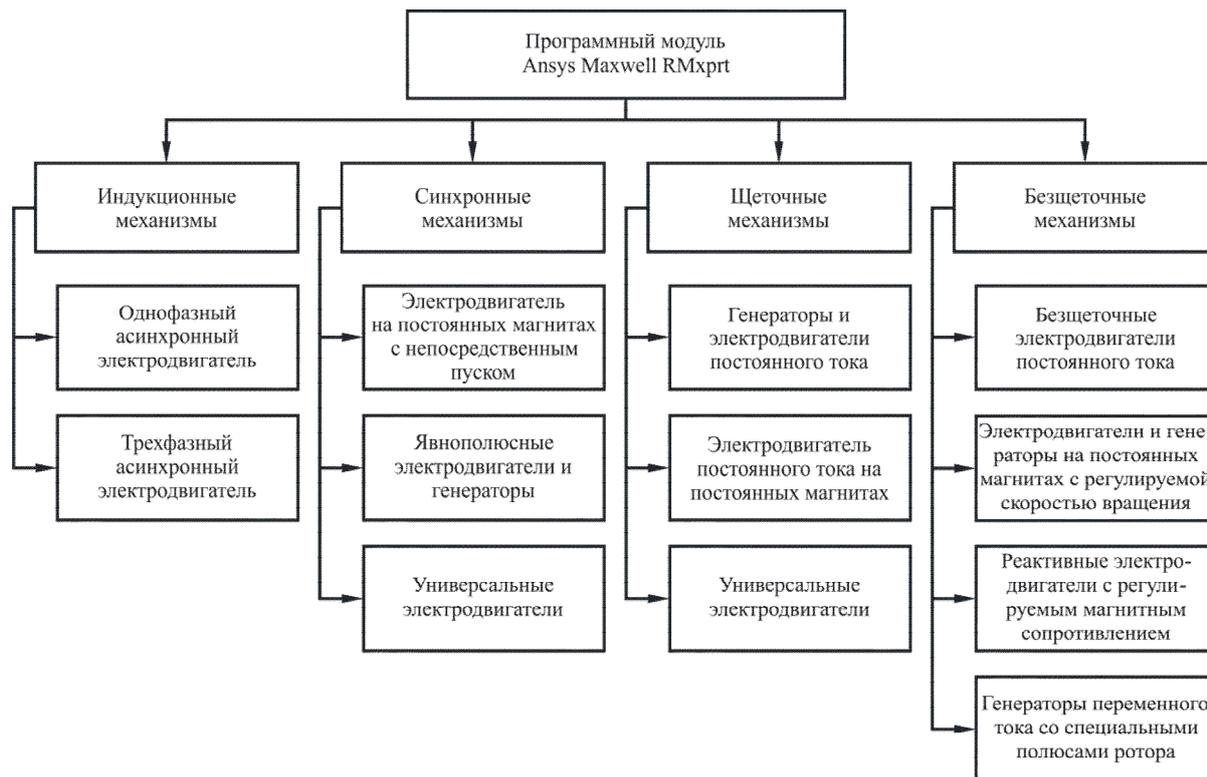
Расчет асинхронного электродвигателя для электротехнологических устройств проводился при следующих исходных данных: выходная мощность 15 кВт, номинальное напряжение 380 В, частота 50 Гц, номинальная скорость вращения 970 об/мин, потери мощности на трение 150 Вт, паразитные потери 750 Вт, рабочая температура составляла 75 °С.

Исходные расчетные параметры статора: число пазов 60, внешний и внутренний диаметры соответственно 340 и 205 мм, длина статора 310 мм, тип стали M19\_24G. Форма пазов выбрана I-го типа с размерами:  $hs0 = 0,8$  мм;  $hs2 = 39,48$  мм;

$bs0 = 3$  мм;  $bs1 = 4,8$  мм;  $bs2 = 8,2$  мм.

Исходные расчетные параметры ротора: число пазов 36, внутренний диаметр 80 мм, длина ротора 310 мм, тип стали M19\_24G. Форма пазов выбрана I-го типа с размерами:  $hs0 = 0,5$  мм;  $hs2 = 14,34$  мм;

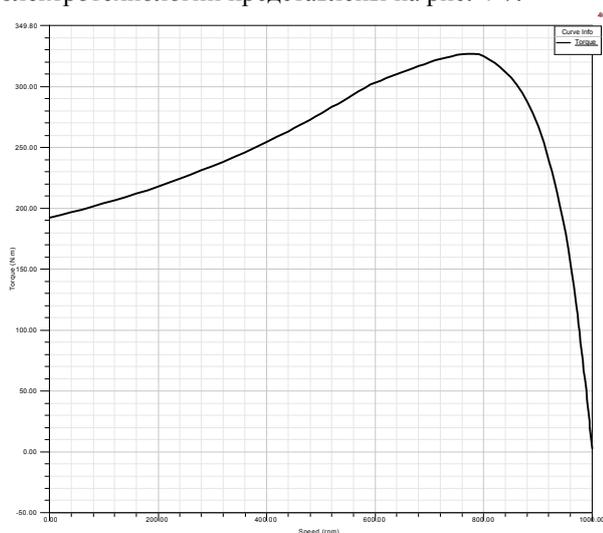
$bs0 = 1$  мм;  $bs1 = 3,3$  мм;  $bs2 = 3,3$  мм.



**Рис. 3.** Основные типы параметризованных моделей программного модуля Ansys Maxwell RMXprt  
**Fig. 3.** Main types of parameterized models of program module Ansys Maxwell RMXprt

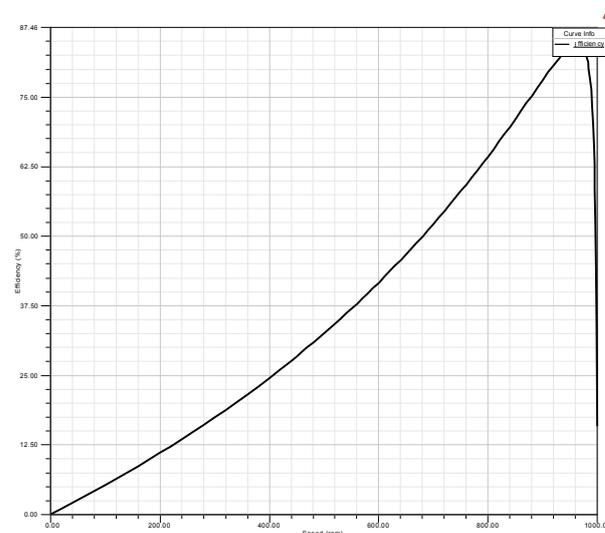
Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя для электротехнологий представлены в виде графически выраженных зависимостей полезного момента (момента на валу)  $M$ , КПД  $\eta$ , фазного тока  $I$  и коэффициента мощности  $\cos(\varphi)$  для различных значений частоты вращения  $n$  ротора.

Результаты моделирования некоторых рабочих характеристик асинхронного электродвигателя для электротехнологий представлены на рис. 4-7.



**Рис. 4.** Зависимость  $M = f(n)$  момента  $M$  (Н·м) электродвигателя от скорости вращения ротора  $n$  (об/мин)

**Fig. 4.** Dependence  $M = f(n)$  of motor torque  $M$  (N·m) and rotary speed  $n$  (rpm)



**Рис. 5.** Зависимость  $\eta = f(n)$  КПД  $\eta$  (%) электродвигателя от скорости вращения ротора  $n$  (об/мин)

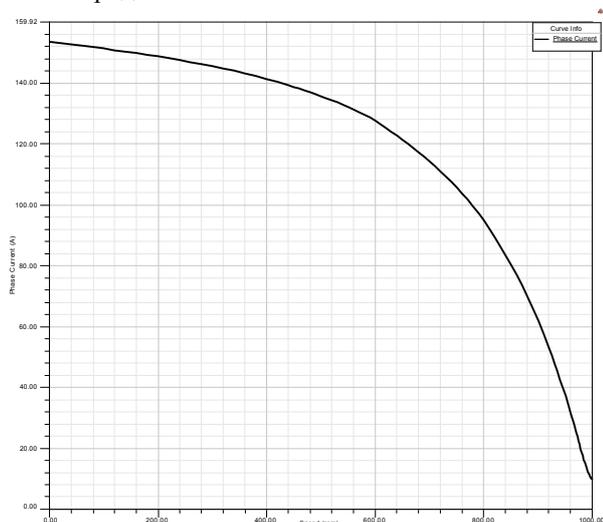
**Fig. 5.** Dependence  $\eta = f(n)$  of efficiency  $\eta$  (%) and rotary speed  $n$  (rpm)

Анализ механической характеристики  $M = f(n)$  электродвигателя (рис. 4) показывает, что момент  $M$  на валу при номинальной скорости вращения  $n$  ротора 970 об/мин составляет 200 Н·м.

Зависимость  $\eta = f(n)$  КПД  $\eta$  электродвигателя от скорости вращения  $n$  ротора изображена на рис. 5. КПД смоделированного электродвигателя

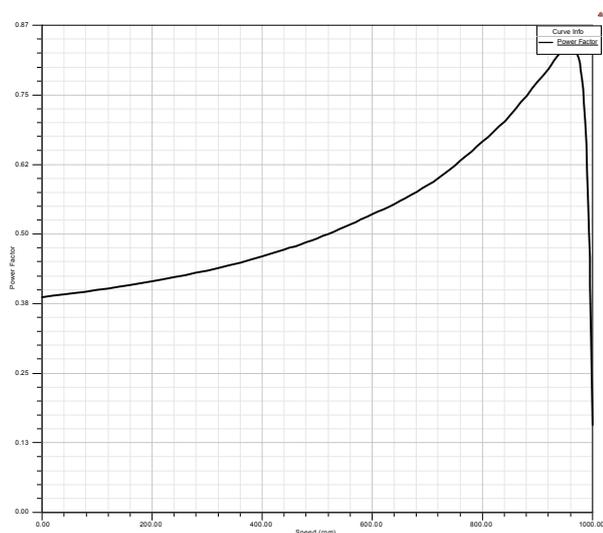
при номинальной скорости вращения  $n$  ротора составляет около 85 %.

Электромеханическая характеристика  $I = f(n)$  электродвигателя продемонстрирована на рис. 6. Ее анализ свидетельствует о том, что в номинальном режиме фазный ток смоделированного асинхронного электродвигателя составляет 45 А.



**Рис. 6.** Зависимость  $I = f(n)$  фазного тока  $I$  (А) электродвигателя от скорости вращения ротора  $n$  (об/мин)

**Fig. 6.** Dependence  $I = f(n)$  of phase current  $I$  (A) and rotary speed  $n$  (rpm)



**Рис. 7.** Зависимость  $\cos(\varphi) = f(n)$  коэффициента мощности  $\cos(\varphi)$  от скорости вращения ротора  $n$  (об/мин)

**Fig. 7.** Dependence  $\cos(\varphi) = f(n)$  of power factor  $\cos(\varphi)$  and rotary speed  $n$  (rpm)

Наименьшее значение коэффициента мощности, как известно из теории электрических машин, соответствует режиму холостого хода. В целях достижения максимального коэффициента мощности асинхронного двигателя чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или, по крайней мере, значительную часть времени с нагрузкой, близкой к но-

минальной. В значительной степени это обеспечивается правильным выбором мощности двигателя во избежание его недогруженности. Коэффициент мощности  $\cos(\varphi)$  (рис. 7) в номинальном режиме работы составляет 0,8.

Таким образом, с использованием программного модуля Ansys Maxwell RMXprt выполнено моделирование 15 кВт асинхронного электродвигателя для электротехнологий и получены его основные рабочие характеристик.

## ВЫВОДЫ

6. Выполнено моделирование асинхронного двигателя для электротехнологий с использованием программного модуля Ansys Maxwell RMXprt.

7. Получены основные рабочие характеристики смоделированного 15 кВт асинхронного электродвигателя для полезного момента (момента на валу)  $M$ , КПД  $\eta$ , фазного тока  $I$  и коэффициента мощности  $\cos(\varphi)$  для различных значений частоты вращения  $n$  ротора.

8. Установлены основные рабочие параметры спроектированного электродвигателя: момент на валу  $M = 200$  Н·м, КПД  $\eta = 85$  %, фазный ток

$I = 45$  А, коэффициент мощности  $\cos(\varphi) = 0,8$ .

9. Проанализированы преимущества использования интерактивных параметризованных моделей программного модуля Ansys Maxwell RMXprt для проектирования электрических машин и анализа их рабочих характеристик.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Алиев И.И. 2004.** Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М.: ИП Радио Софт, 128.
- Басов К.А. 2002.** Ansys в примерах и задачах. М.: Компьютер Пресс, 224.
- Басов К.А. 2005.** Ansys: справочник пользователя. М.: ДКМ Пресс, 640.
- Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. 1982.** Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 392.
- Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е. и др. 2006.** Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. М.: Академия, 368.
- Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. 2007.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 576.
- Бугрим Л.И., Билюк И.С., Кириченко А.С. 2013.** Повышение энергоэффективности электропривода станда для наладки топливорегулирующей аппаратуры. Научно-теоретический профессиональный журнал «Вестник аграрной науки Причерноморье». Николаев: МНАУ. Вып. 3(73), 192-199. (Украина).
- Буль О.Б. 2006.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа Ansys. М.: Академия, 288.

**Герман-Галкин С.Г. 2008.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 368.

**Гудвин Г.К., Гребне С.Ф., Сальгадо М.Э. 2004.** Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 911.

**Иванов Г.О., Шебанин В.С., Бабенко Д.В., Бендера И.М., Думенко К.Н., Полянский П.Н., Быстрый А.М., Кириченко А.С. 2014.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Киев: Аграрное образование, 576. (Украина).

**Карпеченко И., Миронов В., Шкурат С., Полянский П. 2008.** Восстановление изношенных деталей методами газотермического напыления. Motrol. Lublin (Poland). Т. 10. В., 264-267.

**Кириченко А. 2014.** Анализ коэффициента полезного действия электронасосных агрегатов для электротехнологий при использовании винтоканавочных узлов трения. Motrol. Lublin (Poland). Vol. 16. No. 2, 67-73.

**Кириченко А.С. 2013.** Анализ систем частотного управления электроприводов для электротехнологий. Научные работы: научно-методический журнал. Николаев: Изд-во ЧГУ им. Петра Могилы, Вып. 217. Т. 229. Компьютерные технологии, 44-50. (Украина).

**Кириченко А.С. 2013.** Дискретизации непрерывных систем автоматического управления по методу Эйлера. Научно-теоретический профессиональный журнал «Вестник аграрной науки Причерноморье». Николаев: МНАУ. Вып. 1(71), 195-198. (Украина).

**Кириченко А. С. 2014.** Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя электронасосного агрегата для электротехнологий с использованием программного модуля Ansys Maxwell RMXprt. Научные работы: научно-методический журнал. Николаев: Изд-во ЧГУ им. Петра Могилы. Вып. 225. Т.237. Компьютерные технологии, 25-30. (Украина).

**Кириченко А.С. 2014.** Статические характеристики винтоканавочных узлов трения электронасосных агрегатов для электротехнологий. Научный вестник Таврического государственного агротехнологического университета [Электронный ресурс]. Мелитополь: ТДАТУ. Вып.4. – Т.1, 61-68. (Украина).

**Кириченко А.С., Билюк И.С., Бугрим Л.И. 2013.** Моделирование систем автоматического управления электроприводами с помощью z-форм. Научные работы: научно-методический журнал. Николаев: Изд-во ЧГУ им. Петра Могилы. Вып. 201. Т. 213. Компьютерные технологии, 42-44. (Украина).

**Кириченко А.С. 2013.** Повышение энергоэффективности работы электронасосных агрегатов. Вестник НТУ «ХПИ». Харьков, 28-35. (Украина).

**Лихачев В.Л. 2002.** Электродвигатели асинхронные. М.: СОЛОН-Р, 304.

**Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. 1988.** Электрические машины: асинхронные машины, 328.

**Селезнев Ю., Иванов Г., Полянский П. 2008.** Возможности применения углекомпонитных подшипников скольжения в насосах и других машинах сельскохозяйственной техники. Motrol. Lublin (Poland). Т. 10. В., 117-123.

**Соколовский Г.Г. 2006.** Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 265.

**Терехов В.М. 2006.** Системы управления электроприводов. М.: Академия, 304.

**Усолицев А.А. 2006.** Частотное управление асинхронными двигателями. СПб.: СПбГУ ИТМО, 94.

### SIMULATION OF INDUCTION MOTOR USING ANSYS MAXWELL RMXprt PROGRAM MODULE

**Summary.** The paper presents the results of research in the area of scientific exploration of design and simulation of electric machines for electric technologies using Ansys Maxwell RMXprt program module. This program module is based on the analytical theory of electric machines. The mathematical models of generalized asynchronous machine and asynchronous machine with squirrel cage rotor are considered. Simulation of induction motor for electric technologies is performed using an interactive parameterized model of three-phase induction motor.

The initial data of calculation of the induction motor for electric technologies: the output power – 15 kW nominal voltage – 380 V, frequency – 50 Hz, nominal rotary speed – 970 rpm, the power of friction losses – 150 W, parasitic losses – 750 W, the operating temperature – 75 °C.

Design parameters of the stator: the number of slots – 60, outer and inner diameters accordingly – 340 and 205 mm, 310 mm. The stator length – 310 mm, type of steel – M19\_24G. Dimensions of first slots form type:  $hs0 = 0,8$  mm;  $hs2 = 39,48$  mm;  $bs0 = 3$  mm;  $bs1 = 4,8$  mm;  $bs2 = 8,2$  mm.

Design parameters of the rotor: the number of slots – 36, inner diameter – 80 mm. The rotor length – 310 mm, type of steel – M19\_24G. Dimensions of first slots form type:  $hs0 = 0,5$  mm;  $hs2 = 14,34$  mm;  $bs0 = 1$  mm;  $bs1 = 3,3$  mm;  $bs2 = 3,3$  mm.

As a result, performance characteristics of induction motor are obtained. Main operating parameters of simulated induction motor are established. Result parameters of simulation: torque – 200 N·m, efficiency – 85 %, phase current – 45 A, power factor – 0.8.

The advantages of interactive parameterized models of Ansys Maxwell RMXprt program module for the design of electrical machines and analysis of motor performance are analyzed.

**Key words:** induction mechanisms, induction motor, stator, rotor, program module, motor performance.