

УДК 621.31

В. В. Кузнецов, А. В. Николенко, кандидаты техн. наук,
В. П. Иващенко, д-р техн. наук

РАЗРАБОТКА И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. *Описана модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, удобная для анализа изменения его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения. Выполнена оценка адекватности математической модели электромеханического преобразователя по результатам промышленного эксперимента. Рассчитаны среднеквадратические абсолютные и относительные ошибки прогноза.*

Ключевые слова: *математическая модель, асинхронный двигатель, качество питания, показатели энергоэффективности*

**V. V. Kuznetsov, PhD., A. V. Nikolenko, PhD.,
V. P. Ivashchenko., ScD.**

SYNTHESIS AND VERIFICATION OF ADEQUACY OF DYNAMIC ELECTROMAGNETIC MODEL OF ASYNCHRONOUS ENGINE, WORKING IN THE CONDITIONS OF OFF-GRADE ELECTRIC POWER

Abstract. *A three-phase asynchronous motor is described with a shortcircuited rotor by a model, comfortable for the analysis of change's his power indexes at the different values of all indexes's quality of feed-in tansion. In this article is given estimation's of mathematical model of asynchronous motor, which consuming unquality electric power is based on result of industrial experiment. The middle quadratic absolute and relative errors of prognosis are expected.*

Keywords: *mathematical model, asynchronous engine, quality of feeding, indexes of energyefficiency*

В.В. Кузнецов, А.В. Ніколенко, кандидати техн. наук,
В.П. Иващенко, д-р техн. наук

РОЗРОБКА ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ДИНАМІЧНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Анотація. *Описано модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, яка зручна для аналізу його енергетичних показників при різних значеннях усіх показників якості напруги живлення. Виконана оцінка адекватності математичної моделі електромеханічного перетворювача за результатами промислового експерименту. Розраховані середньоквадратичні абсолютні та відносні похибки прогнозу.*

Ключові слова: *математична модель, асинхронний двигун, якість напруги живлення, показники енергоефективності*

Введение

Моделирование электромеханических систем, как известно, позволяет на предпроектной стадии оценить протекающие в них процессы. На основе этих данных могут быть скорректированы параметры силовых установок и систем управления ими. Для асинхронного электродвигателя все это перестало быть проблемой с появлением специализированного программного обеспечения (САД-программ). Оно позволяет строить графики переходных процессов, получать зависимости требуемых параметров от входных факторов и т.д.

Однако, ситуация усложняется, когда необходимо учитывать качественные показатели входного напряжения, такие как несимметрия и несинусоидальность.

Проблема заключается в том, что сама модель в этом случае становится зачастую неадекватной в силу принятых допущений. В случае же использования более сложных аналогов, описание процессов настолько усложняется, что поиск требуемых зависимостей становится вообще невозможным.

Между тем допущение о симметрии и синусоидальности питающего напряжения в настоящее время только в редких случаях является полностью обоснованным. В цехах промышленных предприятий в одной сети с асинхронными двигателями (АД) зачастую эксплуатируются мощные потребители, искажающие форму и нарушающие симметрию напряжения в цеховой сети. Причины возникновения указанных нарушений и несинусоидальности напряжения проанализированы в работах [1 – 3].

Известно также негативное влияние некачественного питания на эксплуатационные характеристики асинхронных машин [4 – 6]. Снижение качества питающего напряжения приводит к пульсации момента, развиваемого двигателем, падению пускового и крити-

ческого моментов АД, повышению вибрации, преждевременному износу подшипников и элементов зубчатых передач, повышению потерь в стали из-за высших гармонических составляющих поля в зазоре, снижению таких энергетических показателей работы асинхронных двигателей как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Для оценки вышеуказанных негативных факторов необходима математическая модель, которая позволяла бы анализировать энергетическую эффективность АД с короткозамкнутым ротором при различных значениях всех показателей качества электрической энергии в сети [7].

Цель исследований

Целью данной работы является синтез и проверка адекватности математического аналога асинхронного двигателя, характеризующего изменение его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения и апробация его программной реализации.

Разработка динамической электромагнитной модели АД, работающего в условиях некачественной электроэнергии

Известно несколько подходов, позволяющих учесть параметры питающего напряжения при моделировании процессов в электромеханических системах [8]. Так при несинусоидальности питающего напряжения в классическом варианте выполняется его спектральный анализ, затем требуемые уравнения записываются для каждой гармоники с учётом её амплитуды и фазы. Эти уравнения решаются аналитически или численно, а искомая величина находится как геометрическая сумма всех гармонических составляющих.

В случае несимметрии питающего напряжения используется метод симметричных составляющих. Недостатком такого подхода является существенное усложнение системы уравнений, описывающих объект. Кроме того, в случае несинусоидального питания необходимо определять симметричные составляющие для каждой учитываемой гармоники. Тогда, в случае если последних будет, например, 10 при несимметричном питании, для каждого базового уравнения, описывающего систему, нужно составить уже 30 уравнений. Для упрощения же их записи, предлагается использовать дифференциальные уравнения, записанные относительно пространственно-временных комплексов (ПВК) [3].

Пространственно-временной комплекс, т.н. обобщённый вектор для любой изменяющейся величины Y рассчитывается следующим образом:

$$Y = \frac{2}{3} (Y_A + \alpha Y_B + \alpha^2 Y_C), \quad (1)$$

где Y_A, Y_B, Y_C – значения рассматриваемой величины по фазам. Проекция этого комплекса на оси фаз соответствуют указанным значениям.

Записанные относительно ПВК уравнения Парка-Горева [3], являющиеся основой известных моделей АД, имеют вид

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_1}{dt}, \quad (2)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_2}{dt} - j\omega_m \underline{\Psi}_2, \quad (3)$$

где \underline{U}_1 – ПВК напряжения статора, $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ – ПВК токов статора, ротора, и тока намагничивания, $\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_2$ – ПВК потокоцеплений статора и ротора, ω_m – угловая скорость вращения АД, R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора.

Необходимо учитывать, что на динамические и энергетические показатели асинхронных двигателей существенное влияние оказывает насыщение магнитопровода. Явление насыщения обусловлено предельной ориентацией магнитных диполей в материале последнего, и, таким образом, прекращения роста магнитного потока с ростом тока намагничивания, как это показано на рис. 1 [9].

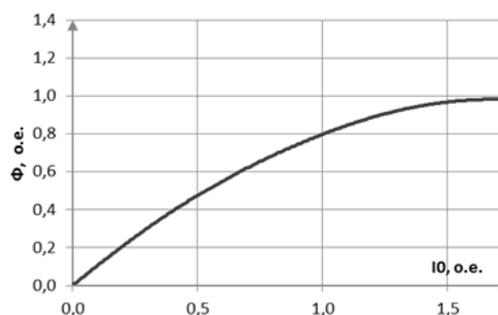


Рис. 1. Зависимость главного магнитного потока от тока намагничивания

Существуют различные методы учета этого влияния [3, 10, 11]. Наилучшее сочетание точности и простоты расчетов дает использование зависимости главной взаимной индуктивности от величины тока намагничивания $L_{12} = f(I_0)$. Например, в [12] приведена зависимость индуктивности от тока намагничивания для асинхронных двигателей общепромышленного исполнения (рис. 2).

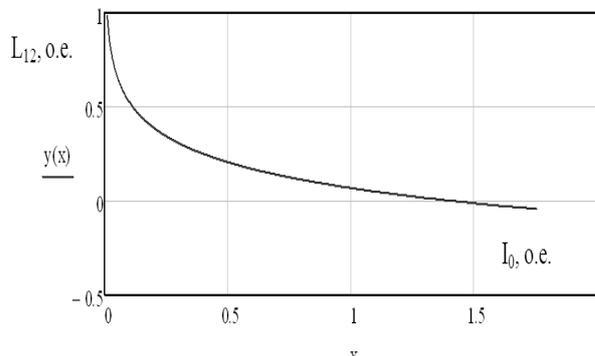


Рис. 2. Зависимость главной индуктивности от тока намагничивания

Такая зависимость может быть описана полиномиальными функциями четных степеней [12]. Величина индуктивности ветви намагничивания без учета эффекта насыщения приведена в справочной литературе [13], либо может быть примерно определена по

результатам опыта холостого хода [14]. Определение же коэффициентов полиномиальной зависимости индуктивности от величины тока намагничивания является самостоятельной задачей. Для моделирования нами взято уравнение из [15].

Таким образом, уравнения для определения потокосцепления необходимо записывать так:

$$\Psi_1 = I_1 \cdot L_1 + L_{12}(I_0) \cdot I_2, \quad (4)$$

$$\Psi_2 = I_2 \cdot L_2 + L_{12}(I_0) \cdot I_1. \quad (5)$$

Структурная схема объекта моделирования, отражающая уравнения (2) и (3) с учетом (4) и (5), представлена на рис. 3.

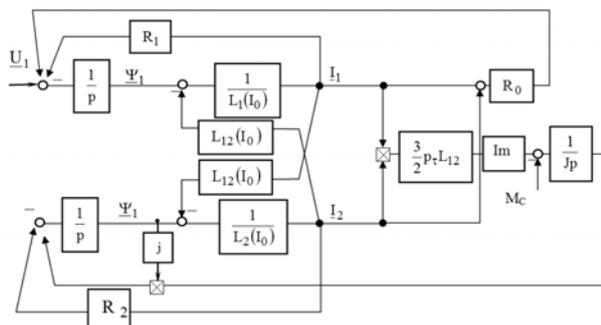


Рис. 3. Структурная схема асинхронного двигателя как объекта моделирования

Использование пространственно–временных комплексов характерно для многих моделей. Так как в них учитываются мгновенные значения токов и напряжений, отпадает необходимость спектрального анализа и записи уравнений для каждой гармоники. Кроме того, поскольку такие уравнения фактически являются свёрнутой записью всех трёх фаз, в них учитывается и возможная несимметрия питающего напряжения. Рассматриваемая система является, фактически, универсальной моделью, позволяющей анализировать процессы как в установившихся, так и в переходных режимах (пуск, выбег, изменение нагрузки).

Аналитическое решение системы уравнений (2), (3) затруднено и связано с рядом существенных допущений [3]. В таких случаях прибегают к известным численным методам, суть которых сводится к представлению бесконечно малых приращений искомой функции некоторыми конечными приращениями (метод Эйлера) и представлением уравнений в форме Коши [16].

Переменными состояния моделируемого объекта в рассматриваемом случае являются скорость асинхронного двигателя, а также пространственно–временные комплексы потокосцепления статора и ротора. Для нахождения последних исходная система уравнений дополнена известными зависимостями

$$M = \frac{3}{2} p_{\tau} L_{12} \text{Im}(\underline{L}_1^* \underline{L}_2), \quad (6)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega_m}{dt}, \quad (7)$$

где M_c – момент статический; J – момент инерции механической части привода; p_{τ} – число пар полюсов.

Программная реализация такой модели АД, работающего в условиях некачественного питания, апробирована путем описания процесса пуска, наброса нагрузки и установившегося режима двигателя типа МТКН 112-6 мощностью 5,3 кВт, характеризующегося следующими данными: $U_{\text{нн}}=310$ В, $n_{\text{ном}}=875$ об/мин, $J=0,08$ кг·м², $R_1=1,61$ Ом, $R_2=2,19$ Ом, $R_0=6,2$ Ом, $L_{1\sigma}=0,00362$ Гн, $L_{2\sigma}=0,00365$ Гн, $L_{12}=0,294$ Гн. В качестве питания в первом случае использовано соответствующее показателям качества, по сути идеальное, трехфазное напряжение, во втором - несимметричное несинусоидальное, соответствующее реальному, показатели которого представлены в табл. 1. Годографы ПВК указанных напряжений, представлены на рис. 4. из которых видно, что несимметричное питание обуславливает эллиптическую форму годографа, а несинусоидальность искажает его форму.

1. Показатели качества питающего напряжения

Отклонение напряжения по фазам, %	A	11,2
	B	18,8
	C	1,0
Коэффициенты гармонических составляющих, %	2	5,8
	3	0,83
	4	1,69
	5	0,03
	6	2,78
	7	0,03
	8	0,08
	9	0,23
	10	0,04

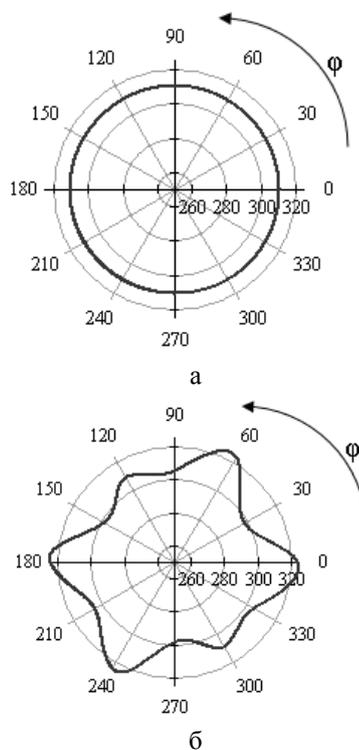
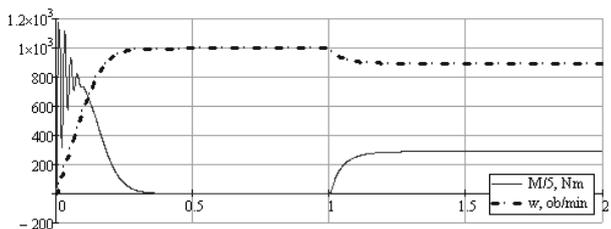
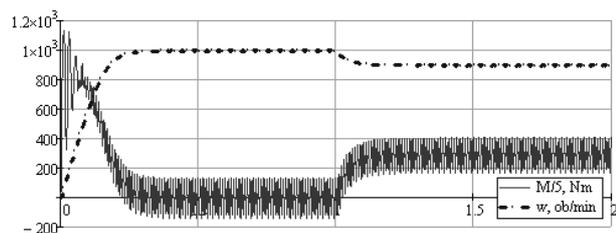


Рис. 4. Годографы пространственно–временных комплексов напряжения, соответствующего показателям качества (а) и несимметричного несинусоидального напряжения (б)

Ниже приведены полученные графики основных координат двигателя. Наличие гармонических составляющих в питании АД приводит, как видно, к возникновению пульсаций момента.



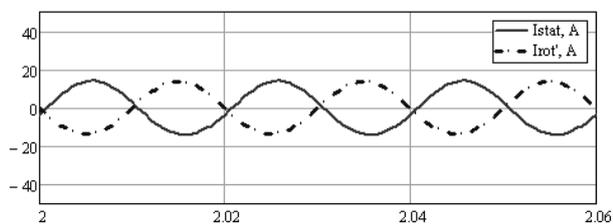
а



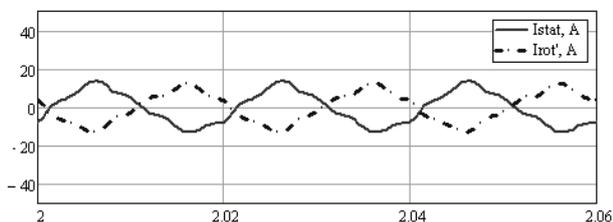
б

Рис. 5. Момент и скорость АД при пуске и набросе нагрузки при идеальном (а) и несимметричном несинусоидальном (б) питающем напряжении

Мгновенные значения токов статора и ротора имеют форму, представленную на рис. 5, а годограф момента асинхронного двигателя в течение одного оборота имеет вид, показанный на рис. 6.



а

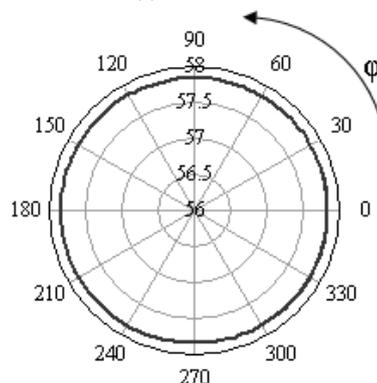


б

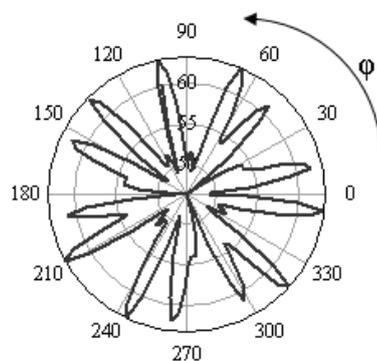
Рис. 6. Токи статора и ротора при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

Анализ полученных энергетических показателей работы АД, представленных в табл. 2, подтверждает, что некачественность питающего напряжения обуславливает рост всех видов потерь, и, соответственно, снижение КПД и коэффициента мощности двигателя.

При этом рост «греющих» потерь от некачественного питающего напряжения, который определяется, как известно, состоянием двигателя и характером нагрузки, в работе не рассматривался. Это является предметом отдельного исследования.



а



б

Рис. 7. Годограф момента АД при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

2. Энергетические показатели АД при его некачественном питании

Показатели	Ед.	Синусоидальное питание	Питание несинусоидальное, несимметричное
Электрические потери в статоре	Вт	491,3	498,3
Электрические потери в роторе	Вт	652,2	661,5
Потери в стали	Вт	89,2	90
Суммарные потери	Вт	1235	1250
КПД	%	81,4	81,2
Коэффициент мощности	о.е.	0,98	0,9

Проверка адекватности синтезированной модели асинхронного двигателя

Наиболее достоверным способом подтверждения адекватности любой математической модели является ее экспериментальная проверка. Необходимо сопоставить экспериментальные значения искомым величинам с полученными на предложенной модели. В качестве экспериментального выбран цех ООО «Укрспец-сервис», где установлен мощный полупроводниковый преобразователь, при работе которого в напряжении цеховой сети присутствуют искажения (несимметрия и несинусоидальность).

В ходе эксперимента получены осциллограммы токов, потребляемых асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором мощностью 11 кВт номинальные параметры которого приведены табл. 3 при питании его от указанной сети. В процессе эксперимента был обеспечен доступ к нулевой точке двигателя, и, таким образом, сняты осциллограммы фазных токов и напряжений. Измерение активных сопротивлений обмоток показало их симметричность и соответствие паспортному значению. Нагрузка на валу АД имела случайный характер и изменялась в широком диапазоне от 2,3 до 12,8 кВт, что соответствует $(0,21 - 1,16) P_{ном}$. За базовые значения энергетических параметров приняты соответствующие ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний».

3. Паспортные данные исследуемого двигателя

Параметр	Единицы измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	11
Ток статора	А	22
Частота вращения	об/мин	1450
КПД	%	91
$\cos \varphi$	о.е.	0,85

Электродвигатель установлен для привода дробилки. Его нагрузка изменялась путем регулирования загрузки питающего бункера. Схема подключений оборудования в ходе эксперимента, показана на рис. 8. Здесь использован измерительный комплекс «СКПЭП» (Система контроля параметров электроприводов), производства ООО НПП «ЦЭД». В состав последнего входят датчики тока и напряжения фирмы LEM (Швейцария), работающие на основе эффекта Холла, динамическая погрешность которых составляет 0,01 %. Измерение скорости осуществлялось тахогенератором типа ТМГ-30. Использован также модуль АЦП фирмы L-Card (Россия). Характеристика измерительных каналов приведена в табл. 4.

4. Характеристика измерительных каналов

Компонент	Характеристики
АЦП	
ТИП	Е-440
Количество каналов	16 дифференциальных
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1,7 мкс
Диапазон входного сигнала	$\pm 5,12$ В; $\pm 2,56$ В; $\pm 1,024$ В
Максимальная частота преобразования	200 кГц
Смещение нуля	$\pm 0,5$ МЗР; макс 1МЗР
Датчик напряжения	
ТИП	LV-400
Диапазон входного сигнала	0 – 500 В
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,015 %
Максимальная динамическая погрешность	0,03 %
Датчик тока	
ТИП	LA-100С
Диапазон входного сигнала	0 – 250 А
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,03 %
Максимальная динамическая погрешность	0,08 %
Тахогенератор	
Тип	ТМГ-30
Коэффициент передачи	1,12 В об/мин

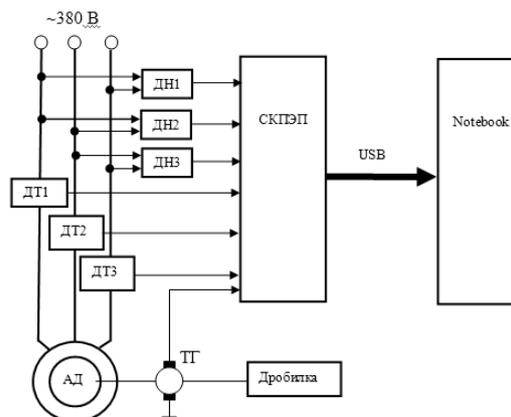
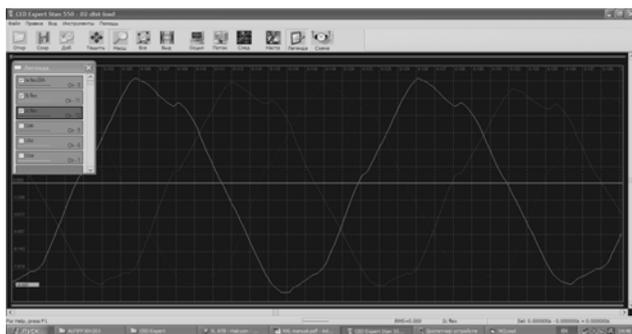


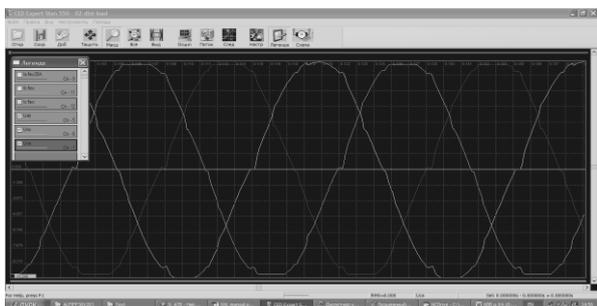
Рис. 8. Схема подключений оборудования для проверки адекватности модели асинхронного двигателя:

ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; ТГ – тахогенератор

На рис. 9 показано окно программы CED Expert в процессе осциллографирования сигналов при работе испытуемого электродвигателя под нагрузкой.



а



б

Рис. 9. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) в исследуемом электродвигателе при работе под нагрузкой

Для сопоставления точности воспроизведения моделью искомых токов одновременно по всем трем фазам использован показатель, определяющий разность произведений проекций тока статора в осях α - β [4]:

$$\varepsilon_i = I_{\alpha i} \cdot \hat{I}_{\beta i} - I_{\beta i} \cdot \hat{I}_{\alpha i}, \quad (8)$$

где $I_{\alpha i}, I_{\beta i}$ – проекции ПКВ тока статора, измеренного на i -м шаге; $\hat{I}_{\alpha i}, \hat{I}_{\beta i}$ – те же величины, полученные по модели.

Прямой и обратный переход от мгновенных значений фазных величин к их комплексной записи и проекциям, использованный в модели, детально рассмотрен в [7, 17, 18]. В качестве критерия адекватности последней использовано относительное среднеквадратическое значение этой разницы за период

$$\delta I = \frac{1}{I_{действ}} \sqrt{\frac{\varepsilon_i^2}{N}}, \quad (9)$$

где N – количество измерений за период; $I_{действ}$ – действующее значение тока.

Кроме того, оценивались точность восстановления скорости, для чего использована величина среднеквадратического отклонения восстановленного и измеренного сигнала:

$$\delta \omega = \frac{1}{\omega_{cp}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\omega_i - \hat{\omega}_i)^2}, \quad (10)$$

где ω_i – действительное значение скорости в i -й момент времени, $\hat{\omega}_i$ – восстановленное значение скорости, ω_{cp} – среднее значение скорости на рассматриваемом интервале.

Массивы фазных напряжений, полученные экспериментально, были использованы в качестве входного воздействия исследуемой модели, при этом ее выходными параметрами являлись фазные токи. Сопоставление последних (рис. 10) показывает, что модель довольно точно отражает реальные процессы в АД. Относительная погрешность не превысила 2,4 %.

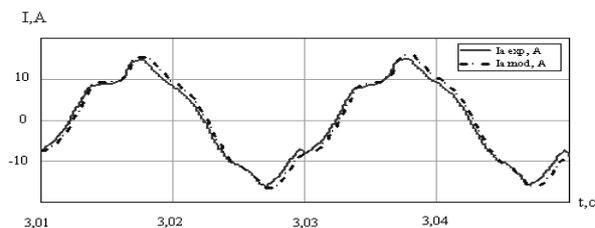


Рис. 10. Ток фазы «А», снятый экспериментально (сплошная линия) и полученный по модели (штриховой пунктир)

На рис. 11 показаны экспериментальные и модельные осциллограммы скорости двигателя при пуске привода вхолостую. Как видно низкое качество электроэнергии проявляется не только в пульсациях тока, но и скорости испытуемого двигателя. Погрешность косвенного определения последней не превышает 4,5 %.

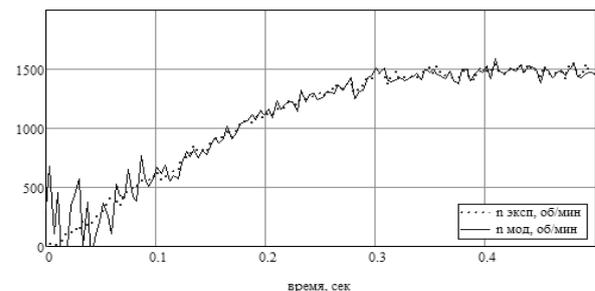


Рис. 11. Скорость двигателя при пуске вхолостую, полученная экспериментально и путем моделирования (сплошная линия)

Основным вопросом проведенных исследований являлось сопоставление указанных выше энергетических величин АД. Степень соответствия их прогноза действительным значениям устанавливалась на основании регрессионного анализа в соответствии с [8, 16]. Результаты последнего показаны на рис. 12. Здесь диапазон изменения суммарных потерь составил 0,98 – 1,62 от их номинального значения вследствие проведенных в процессе эксперимента кратковременных перегрузок АД.

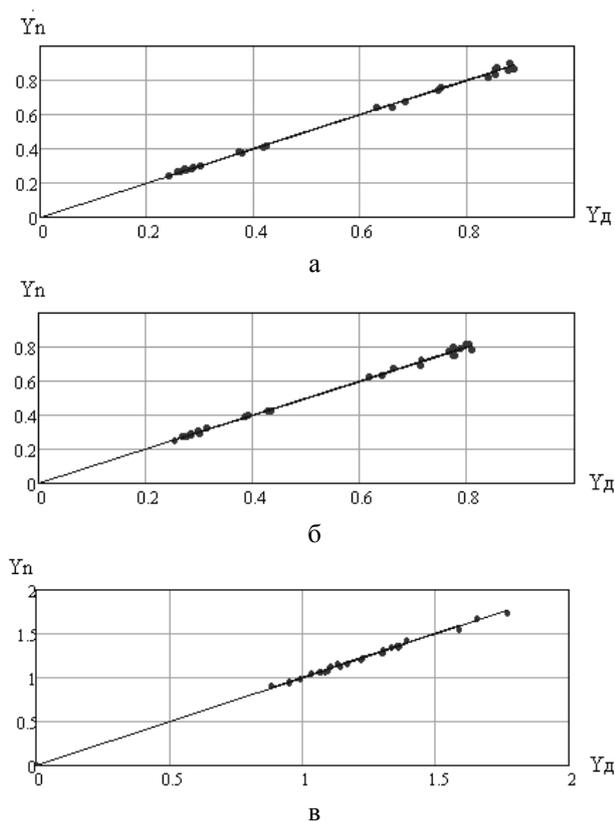


Рис. 12. Соответствие экспериментальных данных результатам моделирования:
 а) КПД двигателя; б) коэффициент мощности; в) суммарные потери

Адекватность модели по каждому критерию оценивалась статистическими методами с использованием регрессионной зависимости [19]

$$Y_n^* = a_0 + a_1 Y_{\partial} \quad (11)$$

где $a_0 = \bar{Y}_n - r_{Y_{\partial} Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_{\partial}} \bar{Y}_{\partial}$; $a_1 = r_{Y_{\partial} Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_{\partial}}$.

Здесь $\bar{Y}_n, \bar{Y}_{\partial}$ – средние значения прогнозируемых и действительных значений; $r_{Y_{\partial} Y_n}$ – коэффициент корреляции между этими величинами; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_{\partial}}$ – среднеквадратичные отклонения. Указанные величины вычислялись по формулам:

$$r_{Y_{\partial} Y_n} = \frac{\sum_1^L (Y_{\partial} - \bar{Y}_{\partial})(Y_n - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_{\partial}} \sigma_{Y_n}} \quad (12)$$

$$\sigma_{Y_{\partial}} = \sqrt{\sum_1^L (Y_{\partial} - \bar{Y}_{\partial})^2 / (L-1)} \quad (13)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)} \quad (14)$$

где $L = 27$ – объем статистической выборки (количество проведенных замеров).

Среднеквадратическая абсолютная ошибка измерений определялась

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^* \quad (15)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента для заданных числа степеней свободы $k = L - 1$ и надежности. В рассматриваемом случае последняя принималась $p = 0,05$. Здесь $\sigma_{Y_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - Y_n^*)^2 / (L-1)} \quad (16)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{n \max} 100\% \quad (17)$$

где $Y_{n \max}$ – наибольшее из полученных значений прогнозируемой величины.

Результаты сравнения прогнозируемых и реальных значений технико-экономических параметров АД при проведении измерений представлены в табл. 5.

Результаты расчетов всех моделируемых величин приведены в табл. 5.

Полученные значения относительной среднеквадратической ошибки прогноза свидетельствуют об адекватности разработанной модели.

5. Результаты сравнения прогнозируемых и реальных значений технико-экономических параметров АД

№ п/п	Потребляемая мощность, кВт	Мощность на валу, кВт	КПД			cos φ			Суммарные потери		
			Реальное, о.е.	Расчетное, о.е.	Ошибка, %	Реальное, о.е.	Расчетное, о.е.	Ошибка, %	Реальные, кВт	Расчетные, кВт	Ошибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6,89	4,4	0,64	0,67	3,2	0,68	0,68	0,0	2,49	2,41	-3,1
2	5,30	1,76	0,33	0,29	-3,8	0,50	0,54	4,2	3,54	3,76	6,0
3	13,35	11,88	0,89	0,89	0,2	0,79	0,75	-4,7	1,47	1,36	-7,5

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	9,81	8,8	0,90	0,90	-0,1	0,81	0,75	-5,9	1,01	0,99	-2,1
5	5,63	2,2	0,39	0,41	1,5	0,54	0,52	-1,6	3,43	3,59	4,7
6	9,44	8,36	0,89	0,85	-3,9	0,81	0,76	-4,9	1,08	1,07	-0,9
7	4,90	1,32	0,27	0,29	1,8	0,47	0,52	5,8	3,58	3,84	7,5
8	14,84	12,76	0,86	0,86	0,0	0,77	0,79	1,6	2,08	1,92	-7,9
9	11,08	10,12	0,91	0,91	-0,8	0,82	0,79	-2,7	0,96	0,91	-5,3
10	11,58	10,56	0,91	0,93	2,0	0,81	0,76	-5,2	1,02	1,09	7,2
11	14,06	12,32	0,88	0,87	-0,5	0,78	0,81	2,8	1,74	1,86	6,9
12	6,41	3,52	0,55	0,53	-1,7	0,63	0,63	0,4	2,89	2,86	-1,0
13	8,77	7,48	0,85	0,86	0,7	0,79	0,84	4,3	1,29	1,23	-4,6
14	7,13	4,84	0,68	0,71	3,2	0,70	0,72	2,0	2,29	2,18	-4,6
15	10,20	9,24	0,91	0,89	-1,6	0,82	0,83	1,1	0,96	1,01	5,1
16	12,70	11,44	0,90	0,94	4,4	0,80	0,81	0,3	1,26	1,30	2,7
17	15,72	13,2	0,84	0,80	-4,4	0,76	0,74	-2,1	2,52	2,47	-2,2
18	5,91	2,64	0,45	0,44	-0,4	0,57	0,62	4,9	3,27	3,13	-4,4
19	12,11	11	0,91	0,91	0,6	0,81	0,84	3,1	1,11	1,05	-6,2
20	7,90	6,16	0,78	0,79	1,4	0,75	0,79	3,4	1,74	1,77	1,8
21	8,17	6,6	0,81	0,85	4,4	0,77	0,79	1,9	1,57	1,52	-3,5
22	6,65	3,96	0,60	0,65	5,0	0,65	0,62	-3,7	2,69	2,66	-1,2
23	10,63	9,68	0,91	0,91	-0,4	0,82	0,78	-3,6	0,95	0,88	-7,0
24	4,31	0,88	0,20	0,25	4,3	0,43	0,46	3,1	3,43	3,22	-6,2
25	6,17	3,08	0,50	0,55	4,7	0,60	0,61	1,7	3,09	3,06	-0,7
26	7,63	5,72	0,75	0,74	-0,9	0,74	0,68	-5,5	1,91	2,03	6,1
27	9,09	7,92	0,87	0,91	4,2	0,80	0,81	0,4	1,17	1,24	5,2

6. Результаты проверки адекватности модели

Критерий	КПД	Коэффициент мощности	Суммарные потери
<i>Коэффициенты регрессионных моделей</i>			
a_0	-0,458	-0,493	0,656
a_1	0,97	1,13	0,98
<i>Показатели точности модели</i>			
Среднеквадратическое отклонение действительного параметра	0,276	0,241	0,319
Среднеквадратическое отклонение прогнозируемого параметра	0,273	0,241	0,317
Коэффициент корреляции	0,99	0,99	0,99
Остаточное среднеквадратическое отклонение	0,0212	0,031	0,017
Абсолютная среднеквадратическая ошибка	0,024	0,027	0,036
Относительная среднеквадратическая ошибка	2,72%	3,0%	3,99%

Выводы

Разработанная универсальная модель асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электромеханической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора.

При проверке адекватности этой модели, полученные значения относительной среднеквадратичной ошибки моделирования свидетельствуют о возможности ее использования для задач вычислительных исследований энергетической эффективности АД.

Поскольку представленный математический аналог АД является инструментом анализа технико-экономических показателей работы электромеханического преобразователя в условиях изменяющихся показателей качества электроэнергии, очевидна необходимость дополнить его вероятностной моделью ценовой электрической сети промышленных предприятий, позволяющей прогнозировать указанные изменения ПКЭ в конкретной электросети.

Список использованной литературы

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000.
2. Жежеленко И. В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, А. В. Горпинич, В. В. Нестерович. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 294 с.
3. Качан Ю. Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 84. – Дніпропетровськ : – 2010. – С. 9 – 16.*
4. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980.
5. Качан Ю. Г. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 83. – Дніпропетровськ : 2009. – С. 113 – 117.*
6. Качан Ю. Г. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 80. – Дніпропетровськ : 2008. – С. 58 – 62.*
7. Качан Ю. Г. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – Дніпропетровськ : – 2008. – Вип. 81., – С. 51 – 54.*
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973.
9. Важнов А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Важнов. – Л. : Энергия, 1968. – 768 с.
10. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения электрических двигателей при их испытаниях (теория, исследование и разработка) [Текст]: Дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Д. И. Родькин. – Кривой Рог : Криворожский технический ун-т, 1994. – 307 л.+прил.204 л.
11. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей [Текст] / И. А. Сыромятников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 396 с.
12. Огарь В. А. Оценка нелинейности индуктивности катушки со сталью энергетическим методом [Текст] / В. А. Огарь // *Вестник КрГПУ. – 2004. – Вып. 2/2004 (25). – С. 78 – 84.*
13. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С.Н. Вешеневский – Изд. 6-е, исправленное. – М. : Энергия, 1977. – 431 с.
14. ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний»

15. Kerkman O, and Russel J. (1985), Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 21, pp. 226 – 234.
16. Башарин А. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ [Текст]: Учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. – Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1990.
17. Качан Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : – 2009. – № 3. – С. 56 – 58.*
18. Качан Ю. Г. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХП», 2009. – № 3. – С. 70 – 74.*
19. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 183 с.

Получено 08.07.2014

References

1. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [The Highest Harmonicas in Systems of Power Supply of Industrial Enterprises], (2000), Moscow, Russian Federation (In Russian).
2. Zhezhelenko I.V. Izbrannyye voprosy nesinusoidalnykh rezhimov v elektricheskikh setyakh predpriyatiy [Select Questions of the Nonsinusoidal Modes are in the Electric Networks of Enterprises], (2007), Moscow, Russian Federation (In Russian).
3. Kachan Yu.G. O kolichestvennoy otsenke kachestva elektricheskoy energii v setyakh promyshlennyykh predpriyatiy [About the Quantitative Estimation of Quality of Electric Energy in the Networks of Industrial Enterprises], (2010) *Girnichna Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb., Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.84, pp. 9 – 16 (In Russian).*
4. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskie mashiny [Electric Machines], (1980), Moscow, Russian Federation (In Russian).
5. Kachan Yu.G. O vliyaniy garmonicheskogo sostava pitayuschego napryazheniya na energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya [About Influence of Harmonic Composition of feed-in Tension on the Power Indexes of Asynchronous Engine], (2009), *Girnichna Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb., Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip. 83, pp.113 – 117 (In Russian).*
6. Kachan Yu.G. O tehniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti raboty asinhronnykh dvigateley v setyakh s nekachestvennoy elektroenergiy [About Technique-Economic Expediency of Work of Asynchronous Engines in Networks with Off-Grade

Electric Power], (2008), *Girnichia Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.80, pp. 58 – 62 (In Russian).

7. Kachan Yu.G., Nikolenko A.V., and Kuznetsov V.V. O modelyakh funktsionirovaniya asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennogo pitaniya [About the Models of Functioning of Asynchronous Engine in the Conditions of Off-Grade Feed], (2008), *Girnichia Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-Tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip. 81, pp. 51 – 54 (In Russian).

8. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical Bases of the Electrical Engineering], (1973), Moscow, Russian Federation (In Russian).

9. Vazhnov A.I. Elektricheskie mashiny [Electric Machines], (1968), Leningrad, Russian Federation (In Russian).

10. Rodkin D.I. Sistemyi dinamicheskogo nagruzheniya elektricheskikh dvigateley pri ih ispytaniyakh (teoriya, issledovanie i razrabotka) [Systems of Dynamic Loading of Electric Engines at their Tests (theory, Research and Development)], (1994), Dis. d-ra tehnikeskikh Nauk: 05.09.03, Krivoy Rog, Ukraine (In Russian).

11. Syromyatnikov I.A. Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh dvigateley [Modes of Operations of Asynchronous and Synchronous Engines], (1984), Moscow, Russian Federation (In Russian).

12. Ogar V.A. Otsenka nelineynosti induktivnosti katushki so stalyu energeticheskim metodom [Estimation of non-linearity of Inductance of Spool with Steel by a Power Method], (2004), *Vestnik KrGPU*, Kremenchug, Ukraine, Vyip. 2/2004 (25), pp. 78 – 84 (In Russian).

13. Veshenevskiy S. N. Harakteristiki dvigateley v elektroprivode [Descriptions of Engines are in an Electromechanic], (1977), Moscow, Russian Federation (In Russian).

14. GOST 7217-87 “Mashinyi elektricheskie vraschayuschiesya. Dvigateli asinhronnyie. Metodyi ispytaniy” [Machines the Electric Running Around. Engines Asynchronous. Methods of Tests].

15. Kerkman O, and Russel J., (1985), Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 21, pp. 226 – 234.

16. Basharin A.V., and Postnikov Yu.V. Primeryi rascheta avtomatizirovannogo elektroprivoda na EVM: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Examples of Calculation of Automatic Electromechanic on Computer], (1990), Leningrad, Russian Federation (In Russian).

17. Kachan Yu.G., Nikolenko A.V., and Kuznetsov V.V. Realizatsiya modeli asinhronnogo dvigatelya dlya usloviy nekachestvennogo pitaniya [Realization of Model of Asynchronous Engine for the Terms of Off-Grade Feed], (2009), Kremenchug, Ukraine (In Russian).

18. Kachan Yu.G., Nikolenko A.V., and Kuznetsov V.V. Otsenka adekvatnosti matematicheskoy modeli asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennogo pitaniya [Estimation of Adequacy of Mathematical Model of Asynchronous Engine in the Conditions of Off-Grade Feed], (2009), *Integrovani Tehnologiyi ta Energo-*

zberzhennya. Schokvartalniy Naukovo-praktichniy Zhurnal, No. 3, Kharkov, Ukraine, pp. 70 – 74 (In Russian).

19. Adler Yu.P., Markova E.V., and Granovskiy Yu.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Planning of Experiment at the Search of Optimal Terms], (1976), Moscow, Russian Federation (In Russian).



Кузнецов
Виталий Вадимович,
канд. техн. наук, доц.
каф. электротехники и
электропривода Нац. ме-
таллургической академии
Украины, г. Днепрпет-
ровск.
Тел. 097-762-43-75.
E-mail:
wit_jane2000@mail.ru



Николенко
Анатолий Васильевич,
канд. техн. наук, доц., зав.
каф. электротехники и
электропривода Нац. ме-
таллургической академии
Украины, г. Днепрпет-
ровск.
E-mail:
nikolenko_etep@mail.ru



Ивашченко
Валерий Петрович,
д-р техн. наук, проф.,
лауреат Государственной
премии Украины в обла-
сти науки и техники, пер-
вый проректор Нац. ме-
таллургической академии
Украины,
г. Днепрпетровск.