

УДК: 621.31

Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В.

**ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ**

**Постановка проблемы.** Тематикой исследований авторов является энергетическая эффективность асинхронного двигателя (АД), работающего в условиях некачественной электроэнергии. Так как серьезные теоретические разработки возможны, в настоящее время, только при наличии адекватной математической модели, описывающей процессы в АД с учетом реальных изменений питающего напряжения, предложен математический аналог двигателя [1], позволяющий анализировать статические и динамические процессы в его электромеханической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора.

Данная статья посвящена оценке адекватности указанной модели по результатам промышленного эксперимента. При этом использованы осциллограммы токов и напряжений асинхронного двигателя (тип АИРХМ132М4УЗ, 11 кВт), работающего в составе электропривода дробилки на ООО НПИК «Коралл Инвест Технологии», г. Днепропетровск. Указанный двигатель питается от цеховой сети к трансформаторной подстанции которой подключен мощный тиристорный преобразователь частоты.

**Состояние вопроса.** Как правило, исследователи разделяют задачи моделирования переходных процессов и анализа энергетического состояния асинхронных машин. При анализе энергетических показателей, таких как коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности и других, пользуются стандартной схемой замещения АД, составленной при допущении об идеальной форме питающего напряжения [2]. Искажение симметрии и синусоидальности последнего приводит к необходимости использования метода симметричных составляющих и спектрального анализа.

Предложенная модель, позволяющая анализировать как переходные процессы, так и установившиеся режимы работы рассматриваемых электрических машин, основана на анализе мгновенных значений питающего напряжения с использованием пространственно-временных комплексов (ПВК). При этом она одновременно описывает две категории параметров – во-первых, временные изменения тока статора, момента и скорости при произвольной форме питающего напряжения, их спектральные характеристики, во-вторых, энергетические показатели (КПД, коэффициент мощности, суммарные потери).

**Условия эксперимента.** В качестве исследуемого объекта использован асинхронный трехфазный двигатель, параметры которого приведены в табл. 1. При этом необходимые для анализа электрические величины измерялись с помощью компьютеризированного диагностического комплекса «СКПЭП», предоставленного фирмой ООО НПП «ЦЭД». В состав последнего входят датчики тока и напряжения фирмы LEM (Швейцария), работающие на основе эффекта Холла, погрешность которых составляет 0,01 %. Измерение скорости осуществлялось тахогенератором типа ТМГ-30. Использован также модуль АЦП фирмы L-Card (Россия), имеющий следующие параметры: количество каналов – 16 дифференциальных, 32 с общей землей; разрядность – 12 бит; время преобразования – 1,7 мкс; максимальная частота дискретизации – 200 кГц.

Таблица 1 – Паспортные данные исследуемого двигателя

Параметр	Ед. изм.	Значение
Номинальная мощность	кВт	11
Ток статора	А	22
Частота вращения	об/мин	1450
КПД	%	91
cosφ	о.е.	0,85

В процессе эксперимента был организован 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: 2,3 кВт – 12,8 кВт (0,21–1,16  $P_{ном}$ ).

**Изложение результатов исследований.** Предварительный анализ экспериментальных данных показал, что напряжение цеховой подстанции не только несинусоидально, но и, несимметрично, что объясняется, вероятнее всего, неравномерной загрузкой фаз. В таком случае для сопоставления точности воспроизведения моделью искомым токам одновременно по всем трем фазам предпочтителен показатель, определяющий разность произведений проекций тока статора в осях  $\alpha$ - $\beta$  [3]:

$$\varepsilon_i = I_{\alpha i} \cdot \hat{I}_\beta - I_{\beta i} \cdot \hat{I}_\alpha, \quad (1)$$

где  $I_{\alpha i}, I_{\beta i}$  – проекции ПВК тока статора, измеренного на  $i$ -м шаге;  $\hat{I}_\alpha, \hat{I}_\beta$  – 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 [4]. В качестве критерия адекватности последней использовано относительное среднеквадратическое значение этой разницы за период:

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

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

Массивы фазных напряжений, полученные экспериментально, были использованы в качестве входного воздействия исследуемой модели, при этом ее выходными параметрами являлись фазные токи. Сопоставление последних (рис. 1) показывает, что модель довольно точно отражает реальные процессы в АД. Относительная погрешность не превысила 2,4 %.

Основным же вопросом проведенных исследований являлось сопоставление указанных выше энергетических величин АД. Степень соответствия их прогноза действительным значениям устанавливалась на основании регрессионного анализа в соответствии с [5,6]. Результаты последнего показаны на рис. 2. Здесь диапазон изменения суммарных потерь составил 0,98–1,62 от их номинального значения вследствие проведенных в процессе эксперимента кратковременных перегрузок АД.

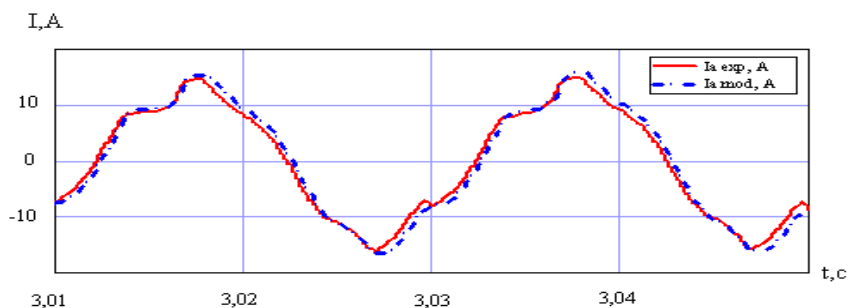


Рисунок 1 – Ток фазы «А», снятый экспериментально (сплошная линия) и полученный по модели (штрихпунктир)

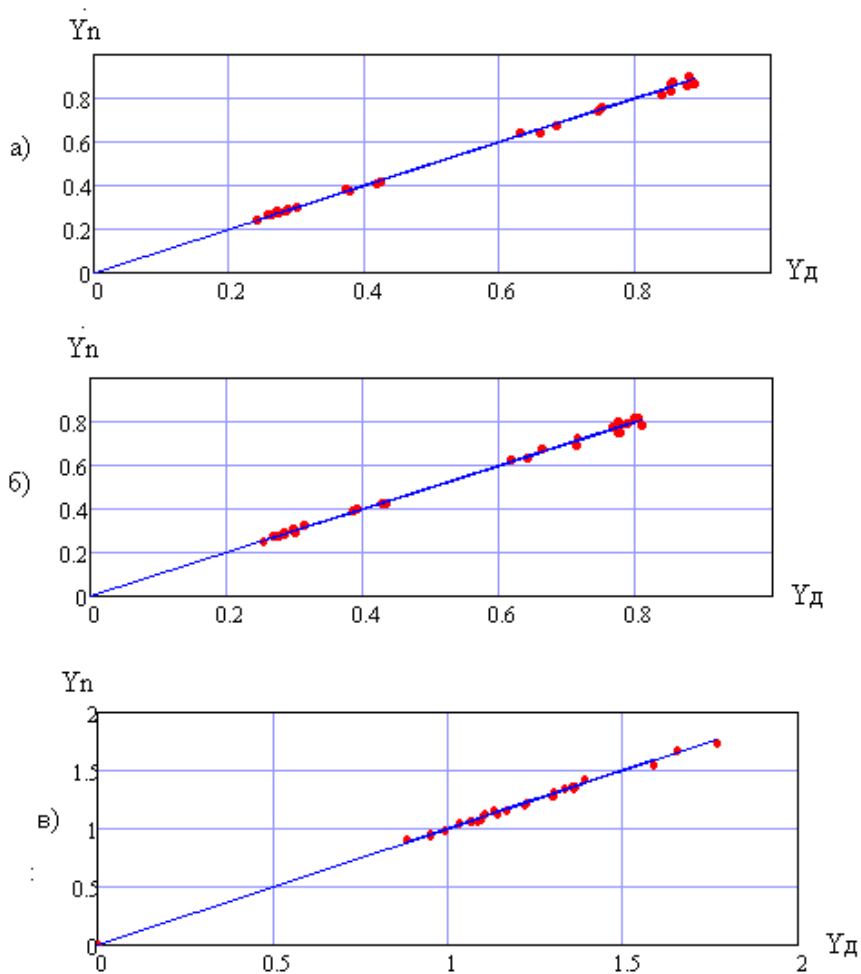


Рисунок 2 – Соответствие экспериментальных данных результатам моделирования:  
а) КПД двигателя; б) коэффициент мощности; в) суммарные потери

Адекватность модели по каждому исследуемому каналу оценивалась известными статистическими методами в следующей последовательности [5]:

$$Y_n^* = a_0 + a_1 + Y_d, \quad (3)$$

где  $a_0 = \bar{Y}_n - r_{Y_d Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_d} \bar{Y}_d$ ;  $a_1 = r_{Y_d Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_d}$ .

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

$$r_{Y_d Y_n} = \frac{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)(Y_n - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_d} \sigma_{Y_n}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{Y_d} = \sqrt{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)^2 / (L-1)}, \quad (5)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)}, \quad (6)$$

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

Среднеквадратическая абсолютная ошибка измерений определялась как:

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^*, \quad (7)$$

где  $t_p$  – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице соответствующего распределения [4] для заданной надежности и числа степеней свободы  $k = L - 1$ . В рассматриваемом случае надежность принималась  $p = 0,05$ . Здесь  $\sigma_{Y_n}^*$  – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - Y_n^*)^2 / (L-1)}. \quad (8)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{n \max} 100\%, \quad (9)$$

где  $Y_{n \max}$  – наибольшее значение прогнозируемой величины.

Полученные результаты для всех моделируемых величин представлены в табл. 2.

**Выводы.** Полученные значения относительной среднеквадратической ошибки моделирования свидетельствуют о достаточной адекватности разработанной модели и возможности ее использования для задач вычислительных исследований энергетической эффективности АД.

Литература

1. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.– 2009.– №3.– с. 56–58.
2. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания // Гірничча електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник.– 2008.– Вип. 81.– с. 97–99.
3. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока.– Харьков: Основа, 2004.– 210 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины.– М.: Энергия, 1980.– 820 с.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.– 183 с.
6. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия. 1975.– 184 с.

УДК: 621.31

Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В.

**ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ**

У статті дана оцінка адекватності математичної моделі асинхронного двигуна, що споживає неякісну електроенергію за результатами промислового експеримента. Розраховані середньоквадратичні абсолютні та відносні похибки прогнозу.

In the article is given estimation's adequacy of mathematical model of asynchronous engine, which consuming unquality electric power is based on result of industrial experiment. The middle quadratic absolute and relative errors of prognosis are expected.