

УДК 621.31

**РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕКАЧЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ****Качан Ю.Г., д.т.н., проф.***Запорожская государственная инженерная академия**69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226***Николенко А.В., к.т.н., доц., Кузнецов В.В.***Национальная металлургическая академия Украины**49000, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4**E-mail: wit\_jane2000@mail.ru*

Описаний трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором моделлю, зручною для аналізу змін його енергетичних показників при різних значеннях всіх показників якості напруги живлення.

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

A three-phase asynchronous engine 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 tension.

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

**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 как такового все это перестало быть проблемой с появлением специализированного программного обеспечения (т.н. 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 сейчас 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 работе [1].

Известно также негативное влияние некачественного питания на эксплуатационные характеристики асинхронных машин [2, 3]. Снижение качества питающего напряжения приводит к пульса-

ции момента, развиваемого двигателем, падению пускового и критического 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 [4].

**Цель работы.** Получение математического аналога асинхронного двигателя, характеризующего изменение его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения и апробация его программной реализации.

**Материал и результаты исследований.** Известно несколько подходов, позволяющих учесть параметры питающего напряжения при моделировании процессов в электромеханических системах [5]. 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 существен-

ное 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) [2].

Пространственно-временной комплекс, т.н. обобщенный 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:

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

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

где  $\underline{U}_1$  – ПВК напряжения статора;  $\underline{L}_1, \underline{L}_2, \underline{L}_0$  – ПВК токов статора, ротора, и тока намагничивания;  $\underline{\psi}_1, \underline{\psi}_2$  – ПВК потокосцеплений статора и ротора;  $\omega_m$  – угловая скорость вращения АД;  $R_1, R_2$  – активные сопротивления статора и ротора.

Структурная схема объекта моделирования, отражающая уравнения (2), (3), представлена на рис. 1.

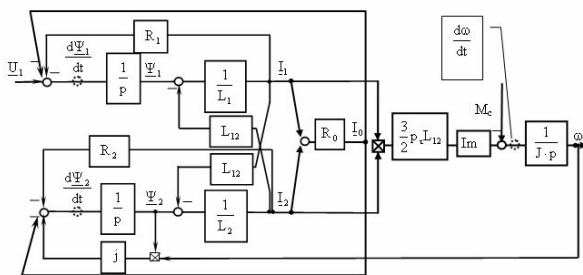


Рисунок 1 – Структурная схема асинхронного двигателя как объекта моделирования

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 трех 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 [2]. 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 [6].

Переменными состояниями 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:

$$\underline{\psi}_1 = \underline{L}_1 \underline{I}_1 + \underline{L}_2 \underline{I}_2, \quad (4)$$

$$\underline{\psi}_2 = \underline{L}_2 \underline{I}_2 + \underline{L}_1 \underline{I}_1, \quad (5)$$

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

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

где  $M_c$  – момент статический;  $J$  – момент инерции механической части привода;  $p_\tau$  – 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 значениями:  $U_{1н} = 310$  В,  $n_{ном} = 875$  об/мин,  $J = 0,08$  кг·м<sup>2</sup>,  $R_1 = 1,61$  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 таблице 1. Годографы ПВК указанных напряжений представлены на рис. 2., из которых видно, что несимметричное питание обуславливает эллиптическую форму годографа, а несинусоидальность искажает его форму.

**Таблиця 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	

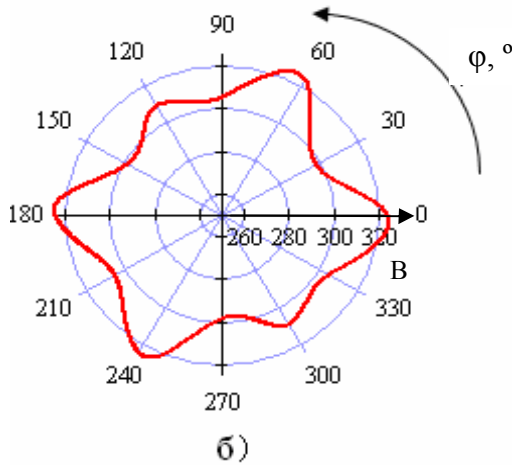
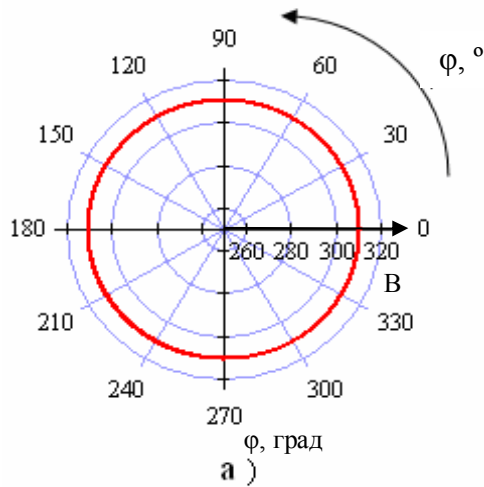


Рисунок 2 – Годографы пространственно-временных комплексов напряжения, соответствующего показателям качества (а) и несимметричного несинусоидального напряжения (б)

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

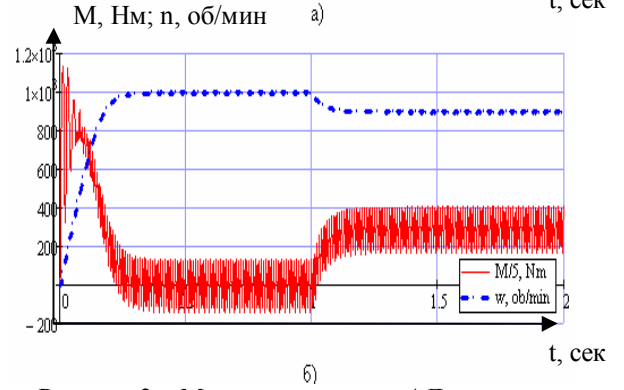
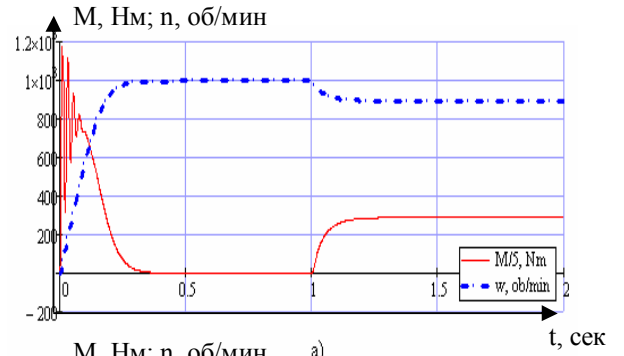


Рисунок 3 – Момент и скорость АД при пуске и набросе нагрузки при идеальном (а) и несимметричном несинусоидальном (б) питающем напряжении

Мгновенные значения токов статора и ротора имеют форму, представленную на рис. 4, а годограф момента асинхронного двигателя в течение одного оборота имеет вид, показаний на рис. 5.

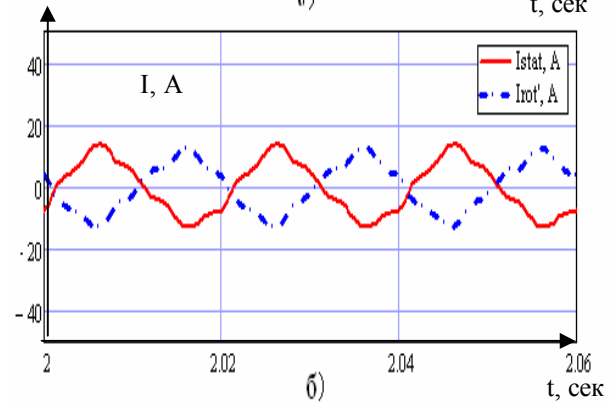
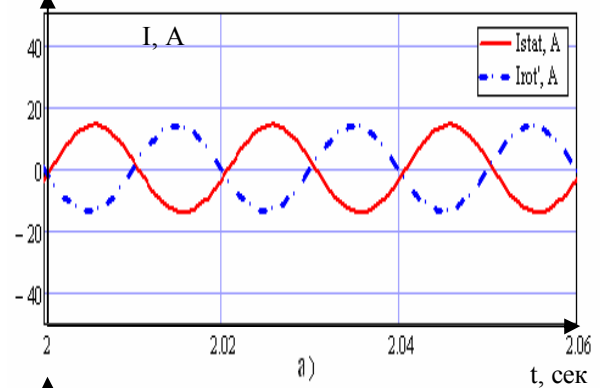


Рисунок 4 – Токи статора и ротора при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

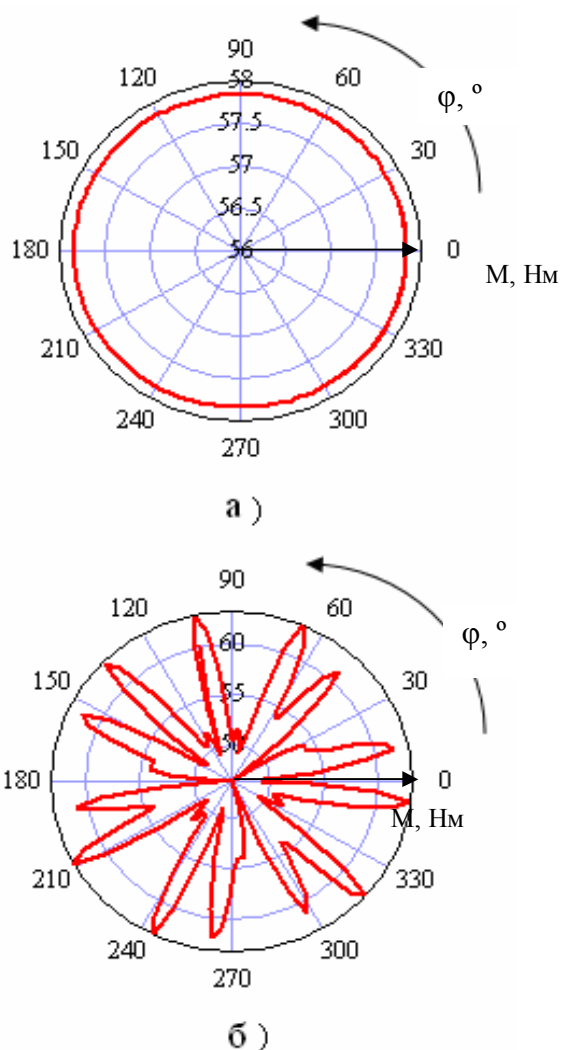


Рисунок 5 – Годограф момента АД при ідеальному (а) і некачественному (б) живленні в установившомуся режимі

Аналіз отриманих енергетичних показників роботи АД, представлених в таблиці 2, підтверджує, що некачественність живлячого напруги обумовлює зростання всіх видів втрат, і, відповідно, зниження ККД і коефіцієнта потужності двигача. При цьому зростає «греючих» втрат від некачественності живлячого напруги, який визначається, як відомо, станом двигача і характером навантаження, в роботі не розглядался. Це являється предметом окремого дослідження.

Таблиця 2 – Енергетичні показники АД при його некачественному живленні

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
Коеффициент мощности	о.е.	0,98	0,9

**Выводы.** Рассмотренная универсальная модель асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электро-механической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора. Она дает возможность исследовать как установившиеся, так и переходные режимы асинхронного двигателя.

Несимметричное и несинусоидальное питание АД приводит к появлению пульсаций токов статора и ротора, а также момента, развиваемого двигателем. В результате ухудшаются энергетические показатели его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Колб А.А., Колб А.А. Теория электроприводу: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – 511 с.
4. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания // Гірничі електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – Вип. 81. –Дніпропетровськ. - 2008. – С. 51-54.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
6. Башарин А.В., Постников Ю.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ: Учебное пособие для вузов. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1990. – 392 с.

Стаття надійшла 30.03.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.