

В. В. КУЗНЕЦОВ, А. В. НИКОЛЕНКО (НМетАУ)

Кафедра електротехники і електропривода Національної металургічної академії України, пр-т Гагарина, 4, г. Дніпропетровськ, 49600, Україна, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: wit_jane2000@mail.ru**СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В СЕТЯХ С НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ****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 работах [1,2].

Известно также негативное влияние некачественного питания на эксплуатационные характеристики асинхронных машин [3-6]. Снижение качества питающего напряжения приводит к пульсации 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 [7].

Цель исследований

Целью данной работы является синтез 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 [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. обобщенный вектор, для любой изменяющейся величины \underline{Y} рассчитывается следующим образом:

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

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:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \quad (2)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\Psi_2}{dt} - j\omega_r \Psi_2 \quad (3)$$

где \underline{U}_1 – ПВК напряжения статора,

$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ – ПВК токов статора, ротора, и тока намагничивания, Ψ_1, Ψ_2 – ПВК потокосцеплений 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, которое 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].

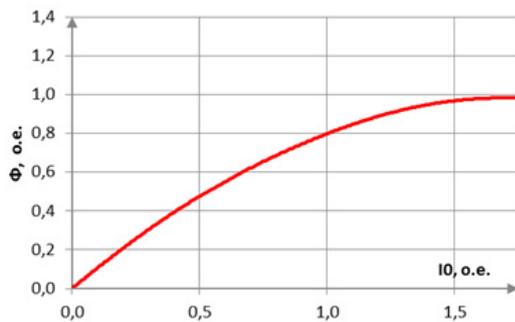


Рис. 1. Зависимость главного магнитного потока от тока намагничивания

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 асин-

хронных электродвигателей общепромышленного исполнения рис. 2.

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, в уравнениях для определения потокосцепления необходимо записывать:

$$\Psi_1 = \underline{I}_1 \cdot L_1 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_2 \quad (4)$$

$$\Psi_2 = \underline{I}_2 \cdot L_2 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_1 \quad (5)$$

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

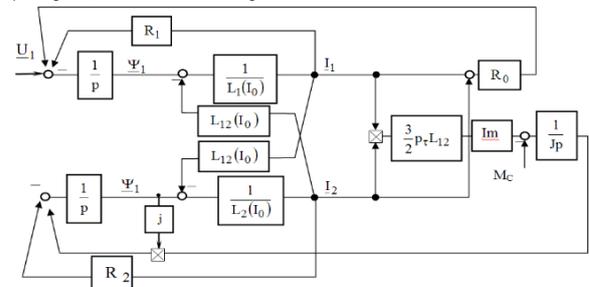


Рис. 3. Структурная схема асинхронного двигателя как объекта моделирования

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 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

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

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

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 значениями: $U_{1н}=310$ В, $n_{ном}=875$ 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 таблице 1. Годографы ПВК указанных напряжений представлены на рис. 4. из которых видно, что несимметричное питание обуславливает эллиптическую форму годографа, а несинусоидальность искажает его форму.

Таблица 1

Показатели качества питающего напряжения

Отклонение напряжения по фазам, %	А	11,2
	В	18,8
	С	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

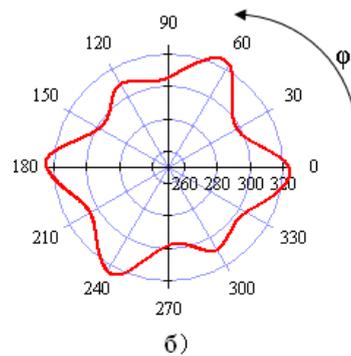
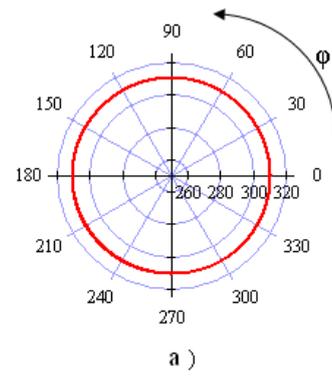


Рис. 4. Годографы пространственно-временных комплексов напряжения, соответствующего показателю качества (а) и несимметричного несинусоидального напряжения (б)

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

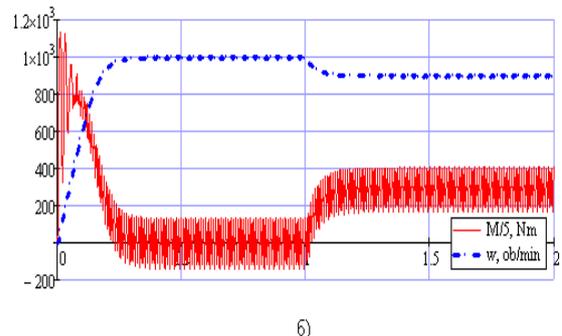
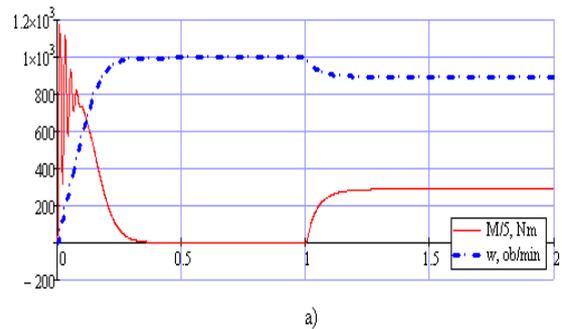


Рис. 5. Момент и скорость АД при пуске и набросе нагрузки при идеальном (а) и несимметричном несинусоидальном (б) питающем напряжении

Мгновенные значения токов статора и ротора имеют форму, представленную на рис. 6, а годограф момента асинхронного двигателя в течение одного оборота имеет вид, показаний на рис. 7.

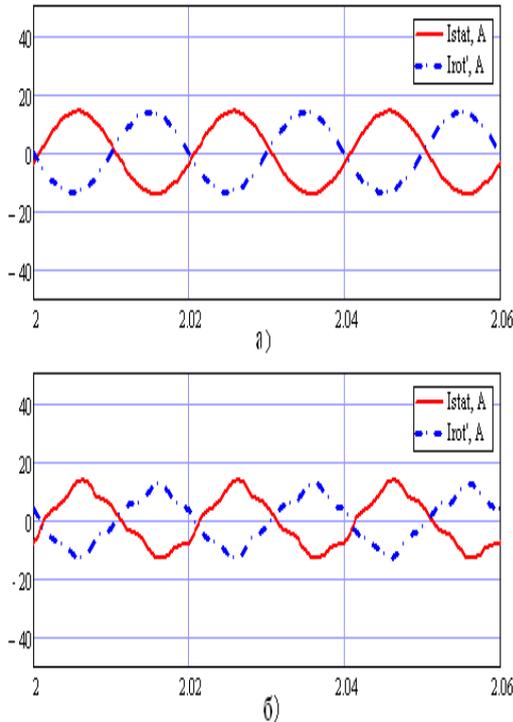


Рис. 6. Токи статора и ротора при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

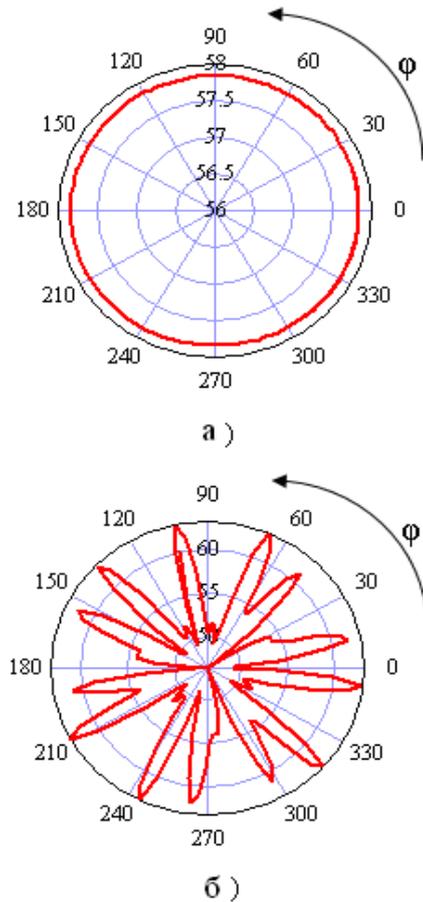


Рис. 7. Годограф момента АД при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

Таблица 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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
2. 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. – 2010. – Вип.84. – Д. – С. 9–16.

Выводы

Рассмотренная нами универсальная модель асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электромеханической 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.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatij* [Higher harmonics in power systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000.
2. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. *O kolichestvennoy otsenke kachestva elektricheskoy energii v setyakh promyshlennykh predpriyatij* [On a quantitative evaluation of the quality of electric power networks in industrial enterprises]. *Girnichna elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb.* [Min-

3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. - М.: Энергия, 1980.
4. Колб, А. А. Теория электропривода [Текст]: Навчальний посібник / А. А. Колб, А. А. Колб. - Д.: НГУ, 2006.
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. - 2009. - Вип.83. - Д. - 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. - 2008. - Вип.80. - Д. - 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: Наук.-техн. зб. - 2008. - Вип.81. - Д. - 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) : дис. д. т. н. / Д. И. Родькин. - Криворожский технический ун-т. - Кривой Рог, 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]: изд. 6-е, исправленное / С. Н. Вешеневский - М.: Энергия, 1977. - 431 с.
14. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
15. Kerkman, O. Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch / O. Kerkman, J. Russel // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1985. - 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. - 3-е изд. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990.
- ing Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2010, no.84, pp.9-16.
3. Ivanov-Smolensky A. V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980.
4. Kolb A., Kolb A. *Teoriya elektroprivodu: Navchal'niy posibnik* [Theory of electric: Manual]. Dnipropetrovsk, National Mining University Publ., 2006.
5. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. *O vliyaniy garmonicheskogo sostava pitayushchego napryazheniya na energeticheskie pokazateli asinkhronnogo dvigatelya* [Influence of the harmonic content of the supply voltage on the energy performance of the induction motor]. *Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb.* [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2009, no.83, pp.113-117.
6. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. *O tekhniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti raboty asinkhronnykh dvigateley v setyakh s nekachestvennoy elektroenergiey* [On the feasibility of asynchronous motors in networks with poor electricity]. *Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb.* [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2008, no.80, pp.58-62.
7. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. *O modelyakh funktsionirovaniya asinkhronnogo dvigatelya v usloviyakh nekachestvennogo pitaniya* [Models of asynchronous motor functioning in conditions of poor nutrition]. *Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb.* [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2008, no.81, pp.51-54.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of Electrical Engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973.
9. Vazhnov A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 768 p.
10. Rodkin D. I. *Sistemy dinamicheskogo nagruzheniya elektricheskikh dvigateley pri ikh ispytaniyakh (teoriya, issledovanie i razrabotka)*. Dr., Dis. [Systems dynamic loading of electric motors in their tests (theory, research and development). Dr. Sci.Diss]. Krivoy Rog, 1994. 511 p.
11. Syromyatnikov I. A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 396 p.
12. Ogar' V. A. *Otsenka nelineynosti induktivnosti katushki so stal'yu energeticheskim metodom* [Score nonlinearity inductor with steel energy method]. *Vestnik KrGPU* [Bulletin of KrGPU], 2004, no.25, pp.78-84.
13. Veshenevskiy S. N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode* [Engine characteristics to the drive]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 431 p.
14. GOST 7217-87. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Dvigateli asinkhronnye. Metody ispytaniy* [State Standard 7217-87. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. test methods].
15. Kerkman, O. Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch / O. Kerkman, J. Russel // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1985. - Vol. 21. - Pp.226-234.
16. Basharin A. V., Postnikov Yu.V. *Primery rascheta avtomatizirovannogo elektroprivoda na EVM* [Examples of the calculation of the drive on a computer-aided]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990.

Поступила в печать 28.05.2013.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*Внешний рецензент *Гончаров Ю. П.*

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

Для решения проблемы с адекватностью модели в силу принятых допущений и, в тоже время, во избежание ее более сложных аналогов при моделировании электромеханических систем, разработана модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, удобная для анализа изменения его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения. Универсальность модели асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электромеханической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора, а также дает возможность исследовать как установившиеся, так и переходные режимы асинхронного двигателя.

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

УДК 621.31

В. В. КУЗНЕЦОВ, А. В. НИКОЛЕНКО (НМетАУ)

Кафедра электротехники і електроприводу Національної металургійної академії України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: wit_jane2000@mail.ru

СИНТЕЗ ДИНАМІЧНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ В МЕРЕЖАХ З НЕЯКІСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

Метою роботи є синтез математичного аналога асинхронного двигуна, який характеризується зміною енергетичних показників при різних значення усіх показників якості живлячої напруги і апробация його програмної реалізації.

Для вирішення проблеми з адекватністю моделі в силу прийнятих припущень і, в той же час, щоб уникнути її більш складних аналогів при моделюванні електромеханічних систем, розроблена модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зручна для аналізу зміни його енергетичних показників при різних значеннях всіх показників якості живлячої напруги. Універсальність моделі асинхронного двигуна дозволяє аналізувати статичні і динамічні процеси в електромеханічній системі при несинусоїдній і несиметричному живленні статора, а також дає можливість досліджувати як усталені, так і перехідні режими асинхронного двигуна.

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

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Гончаров Ю. П.*

UDC 621.31

V. V. KUZNETSOV, A. V. NIKOLENKO (NMetAU)

The department of electrical engineering and the National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina Ave, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine Tel.: (056) 374-84-46, e-mail: wit_jane2000@mail.ru

SYNTHESIS DYNAMIC ELECTROMAGNETIC MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR, WORKS IN NETWORKS WITH POOR ELECTRICITY

The aim of the work is the synthesis of mathematical analog of the induction motor, which characterizes the change in its energy performance for different values of quality indicators for power on and testing its software implementation.

To solve the problem of the adequacy of the model because of the assumptions adopted and, at the same time avoiding more complex analogies in modeling of electromechanical systems, the model of three-phase asynchronous motor with squirrel cage is suitable for the analysis of changes in its energy performance for different values of the indexes of the quality of the supply voltage. Universality of the induction motor model allows us to analyze the static and dynamic processes in the electromechanical system at nonsinusoidal and unbalanced nutrition stator, and also gives the opportunity to explore how to install, and transient modes of induction motor.

Keywords: mathematical model induction motor, power quality, energy efficiency.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Goncharov U. P.*

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013