

**КОМПЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО АГРЕГАТУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ANSYS MAXWELL
RMXPRT**

Г. Я. Клендій, старший викладач

П. Б. Клендій, кандидат технічних наук, доцент

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

О. П. Дудар, викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»

E-mail: [pklen @i.ua](mailto:pklen@i.ua)

Анотація. Велика частка споживання електроенергії в сільськогосподарському виробництві припадає на електроприводи, зокрема в зерносушильному устаткуванні. Електроприводи вентиляторів зерносушильних агрегатів комплектуються асинхронними електродвигунами і в переважній більшості є неавтоматизованими. Вони не здатні забезпечити сучасних вимог до надійності та якості керування, їх енергоефективність є порівняно низькою. Вирішити цю проблему дозволяє автоматизація та розробка автоматизованих систем керування електроприводами вентиляторів. У якості таких систем може бути використана система частотного керування зі скалярним принципом керування та параболічною залежністю між напругою та частотою живлячої мережі. Системи скалярного частотного керування широко використовуються для приводів вентиляторів і насосів, а векторне частотне керування використовується для електроприводів з широким діапазоном регулювання. Ці системи є енергоефективними, а економія електроенергії при їх використанні становить до 30 %. Однією з тенденцій в області енергозберігаючих технологій останніх років є застосування частотно-регульованих приводів на основі асинхронних короткозамкнених електродвигунів і напівпровідникових перетворювачів частоти, що знижують споживання електричної енергії, підвищують степінь автоматизації, зручність експлуатації обладнання і якість технологічних процесів. У складі частотно-регульованого асинхронного електропривода вибір і узгодження параметрів перетворювача частоти і асинхронного короткозамкненого двигуна є головним питанням. Оскільки при зміні частоти обертання електропривода змінюються його енергетичні показники, то потрібно визначити раціональні параметри робочих характеристик асинхронного двигуна. Для цього в програмному забезпеченні ANSYS MAXWELL RMXPRT

змодельовано асинхронний електродвигун потужністю 15 кВт з номінальною частотою 1460 об/хв. Побудовані та проаналізовані його основні робочі характеристики, а саме залежності моменту двигуна, фазного струму та ККД від швидкості обертання ротора, а також залежність моменту двигуна M від ковзання s . Проведений параметричний аналіз для моменту M та ККД двигуна при варіаціях частоти в діапазоні від 50 до 400 Гц.

Ключові слова: асинхронний двигун, програмне забезпечення ANSYS MAXWELL RMXprt, частотний перетворювач, енергоефективність

Актуальність. В аграрному виробництві спостерігається тенденція до підвищення енергоефективності роботи зерносушильного устаткування, зокрема, електроприводів вентиляторів зерносушарок. Електроприводи вентиляторів зерносушильних агрегатів в переважній більшості є неавтоматизованими. Вони не здатні забезпечити сучасних вимог до надійності та якості керування, їх енергоефективність є порівняно низькою. Вирішити дану проблему дозволяє автоматизація та розробка автоматизованих систем керування електроприводами вентиляторів.

Оскільки приводом вентиляторів зерносушильного устаткування, як правило, виступають асинхронні двигуни, то виникає необхідність в розробці автоматизованих систем керування ними. У якості таких систем може бути використана система частотного керування зі скалярним принципом керування та параболічною залежністю між напругою та частотою живлячої мережі. За статистичними даними економія електроенергії при використанні частотного керування досягає до 30 % порівняно з неавтоматизованими системами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Автоматизація зерносушильного устаткування дозволяє з максимальною ефективністю використовувати його, підвищити коефіцієнт корисної дії, поліпшити роботу, усунути всяку можливість погіршення якості зерна при сушінні [1, 2, 3, 4].

Ще одним шляхом поліпшення робочих показників зерносушарок є використання автоматизованих систем керування електроприводами вентиляторів цих зерносушарок [5]. Оскільки в переважній більшості в неавтоматизованих електроприводах зерносушарок використовуються двигуни змінного струму, та

особливо, асинхронні двигуни, то під проведення автоматизації таких електроприводів рекомендується використовувати системи частотного керування [6, 7, 8]. Ці системи є енергоефективними, а економія електроенергії при їх використанні становить до 30 % [9, 10]. Системи скалярного частотного керування широко використовуються для приводів вентиляторів і насосів, а векторне частотне керування використовується для електроприводів [11] з великими діапазонами регулювання.

Мета дослідження – змоделювати асинхронний двигун у складі електропривода зерносушильного агрегату з використанням програмного забезпечення ANSYS MAXWELL RMXprt та визначити раціональні енергетичні параметри електропривода.

Матеріали та методи дослідження. Схему асинхронної машини з короткозамкненим ротором (АКЗ) можна отримати з узагальненої схеми [11], якщо обмотки ротора замкнути на коротко. При цьому в загальних рівняннях слід прийняти $\bar{u}_R = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j\alpha_k \bar{\Psi}_S, \\ 0 = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - \rho v) \bar{\Psi}_R, \\ \bar{\Psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\Psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R, \\ m = k \text{Mod}(\bar{\Psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m - \frac{dv}{dt} = m - m_H. \end{array} \right. \quad (1)$$

Для динамічних систем необхідно враховувати перехідні електромагнітні процеси в машині [12]. У цьому випадку в якості пари змінних, що описують машину, залишимо просторові вектори статора і потокозчеплення ротора $(\bar{i}_S, \bar{\Psi}_R)$, тоді рівняння (1) приймуть вигляд:

$$\bar{u}_S = r\bar{i}_S + x'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\alpha_k x'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R \rho v \bar{\psi}_R,$$

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

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

$$\bar{T}_m \frac{dv}{dt} = m - m_H,$$

де $r = (r_S + k_R^2 r_R)$, $x'_S = \left(x_S - \frac{x_m^2}{x_R} \right)$, $k_R = \frac{x_m}{x_R}$, $\bar{T}_R = \frac{x_R}{r_R}$ – безрозмірні коефіцієнти.

Для того щоб краще зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються в АКЗ, її досліджують в різних системах координат. Для представлення просторових векторів використовується комплексна площина.

Ansys Maxwell RMxprt – програмний модуль, призначений для розробки та оптимізації обертових електричних механізмів. За допомогою RMxprt користувач може розраховувати продуктивність механізму, приймати попередні рішення про розміри, виконувати аналізи типу «що, якщо». RMxprt є відправною точкою в методології проектування електричних двигунів і приводів, також він автоматично створює модель системного рівня і геометричні дані, дозволяючи покращувати первинну конструкцію і об'єднувати її з системами живлення та керування.

RMxprt надає користувачеві машинно-орієнтовані інтерфейси на основі шаблонів для роботи з асинхронними, синхронними, безщітковими і щітковими механізмами. Це забезпечує простоту введення параметрів та розрахунку альтернативних варіантів конструкції на ранніх етапах проектування. Програма дозволяє швидко розраховувати найважливіші показники продуктивності: співвідношення обертовий момент / швидкість, втрата потужності, магнітний потік в повітряному зазорі, коефіцієнт потужності, ККД.

Для розрахунку параметрів продуктивності механізму, нелінійних магнітних параметрів і об'ємних ефектів RMxprt використовує класичну аналітичну теорію двигунів і еквівалентні методи схем на магнітних елементах.

Результати досліджень та їх обговорення. Числові дані електродвигуна вводяться через інтерактивний інтерфейс програмного забезпечення Ansys Maxwell RMxprt, яке дозволяє досліджувати робочі характеристики асинхронного двигуна в складі електропривода зерносушильного агрегату та проводити аналіз цих характеристик при варіаціях частоти живлячої мережі.

Геометрія пазів статора та ротора показані на рис. 1.

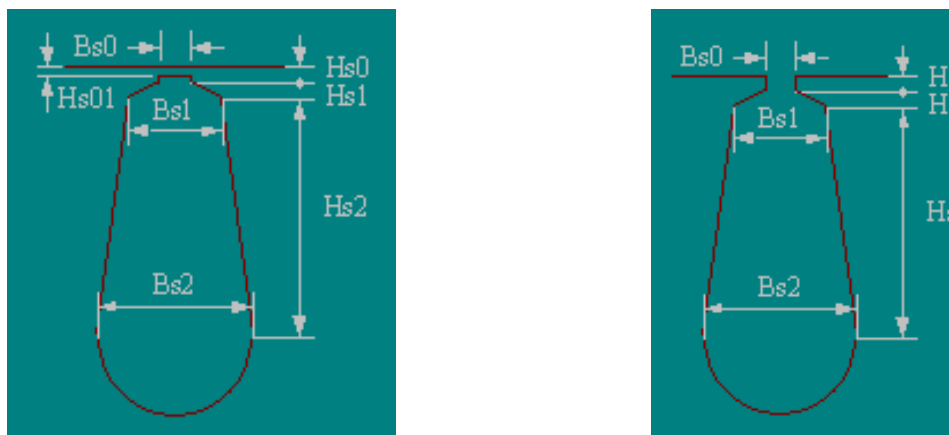


Рис. 1. Геометрія пазів статора (а) та ротора (б)

Результати моделювання асинхронного електродвигуна показані в вигляді ілюстрацій на рис. 2-3.

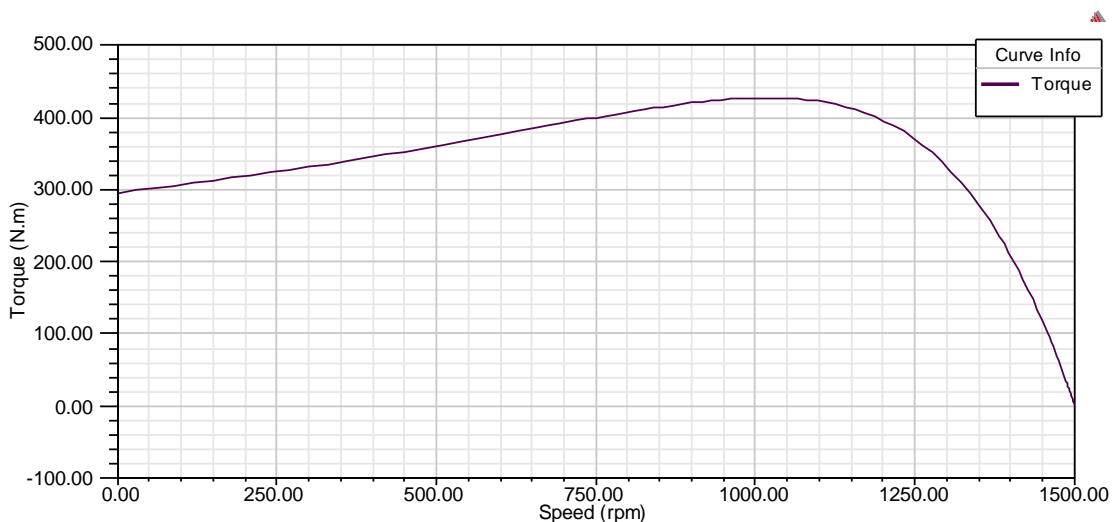


Рис. 2. Механічна характеристика електродвигуна

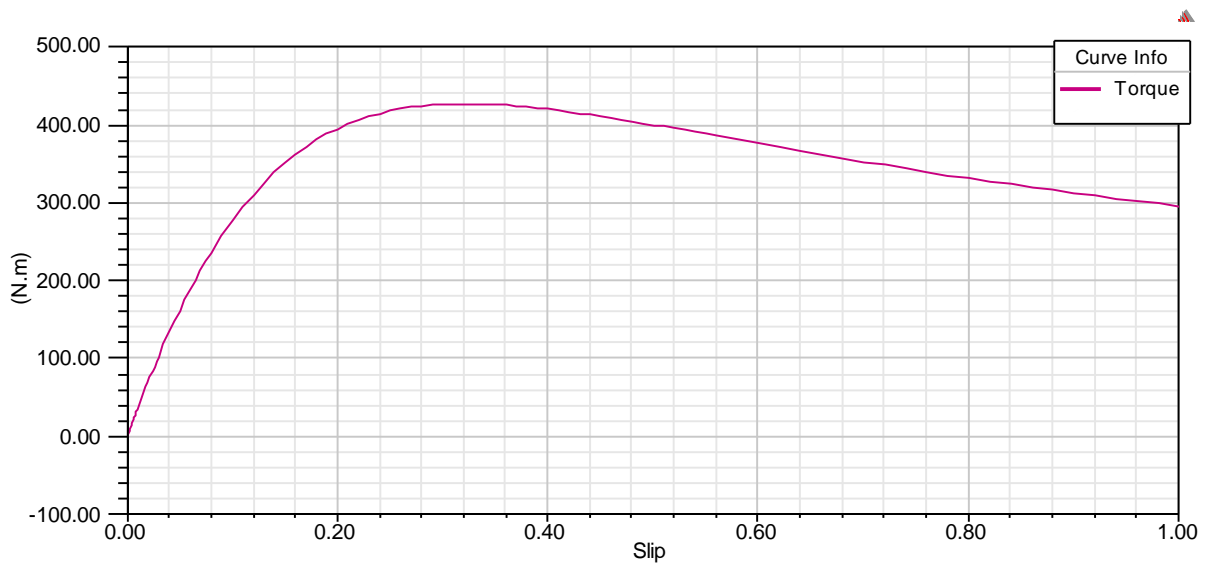


Рис. 3. Залежність моменту M (Н·м) електродвигуна від ковзання s

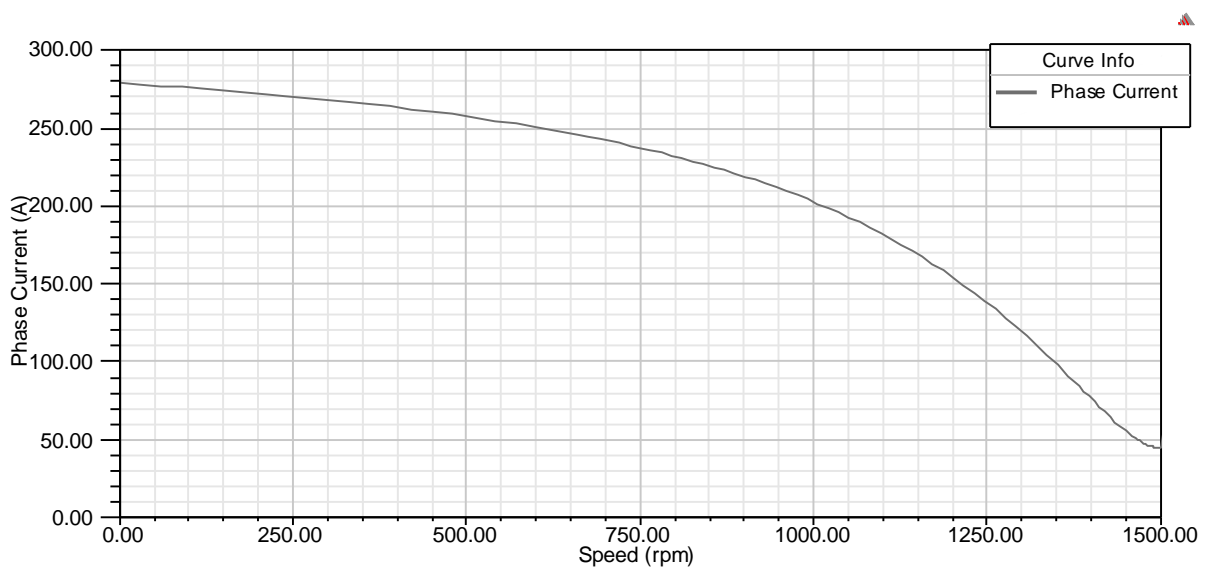


Рис. 4. Залежність фазного струму I (А) електродвигуна від частоти обертання ротора n (об/хв)

Найбільшого значення крива моменту $M = f(n)$ досягає при значенні близько 1000 об/хв, якому відповідає значення моменту 425 Н·м (див. рис. 2). При номінальній частоті обертання 1460 об/хв номінальний момент становить приблизно 80 Н·м, а крива моменту $M = f(s)$ досягає найбільшого значення при значенні ковзання 0,3, при цьому момент електродвигуна дорівнює 425 Н·м (див. рис. 3).

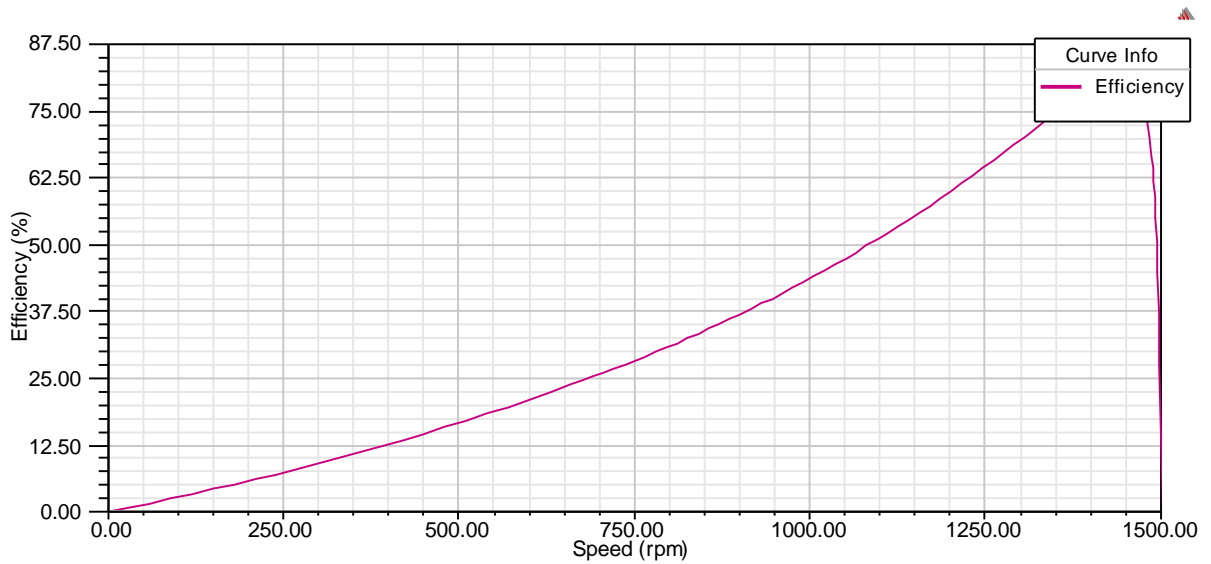


Рис. 5. Залежність $\eta = f(n)$ ККД η (%) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв)

Залежність $I = f(n)$ показує (рис. 4), що при номінальній частоті обертання 1460 об/хв фазний перевищує значення 50 А.

ККД спроектованого асинхронного двигуна не перевищує значення 87,5 % та є найбільшим в діапазоні частот обертання 1300...1475 об/хв. (рис. 5).

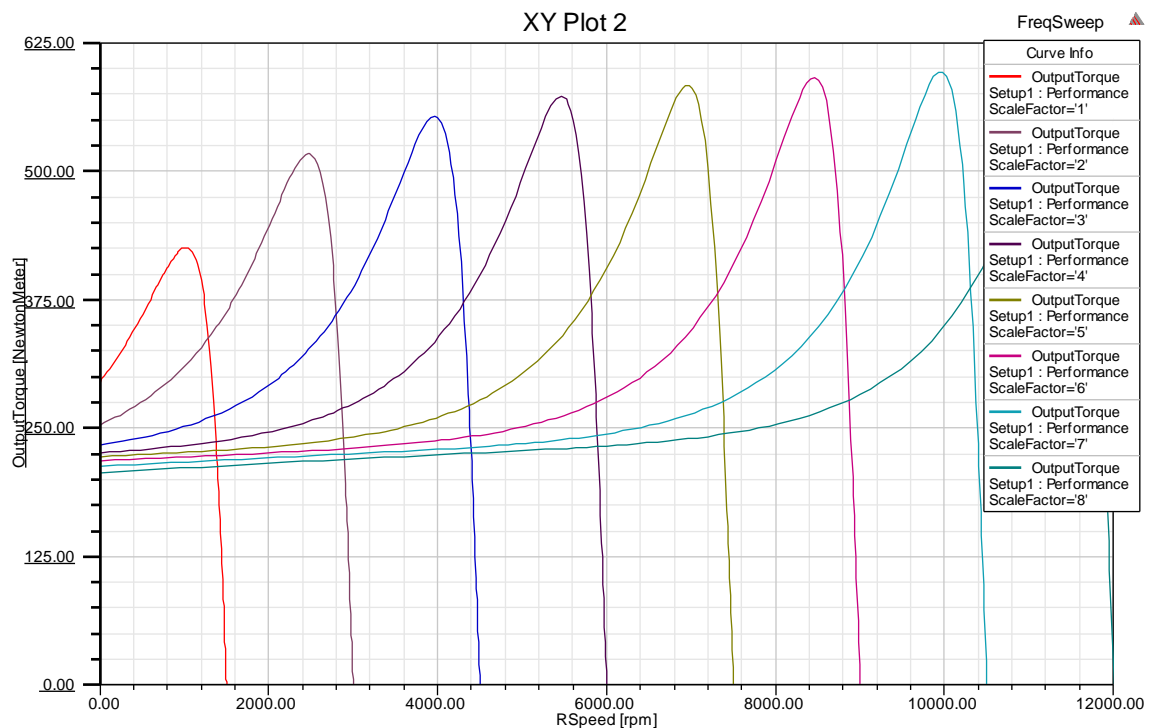


Рис. 6. Сімейство механічних характеристик двигуна при варіаціях частоти $f = 50, 100...400$ Гц

У програмі Ansys Maxwell RMxprt є можливість проведення параметричного аналізу. При варіаціях частоти від 50 до 400 Гц з кроком 50 Гц з одночасним збільшенням напруги живлення U у програмі Ansys Maxwell RMxprt побудовані сімейства кривих для моменту M та для ККД η спроектованого електродвигуна (рис. 6-7).

З сімейства механічних характеристик видно, що при одному й тому ж значенні моменту M для кожної кривої характерне власне значення частоти обертання n . Причому зі збільшенням частоти f живлячої мережі частота обертання двигуна n також збільшується, і відповідно, а при зменшенні f відбуватиметься зменшення частоти обертання n електродвигуна. Саме на цій особливості побудовані системи частотного керування з використанням частотних перетворювачів. Цей спосіб керування електродвигунами зараз є найпопулярнішим у промисловості та сільському господарстві через свою простоту та відносно низьку вартість.

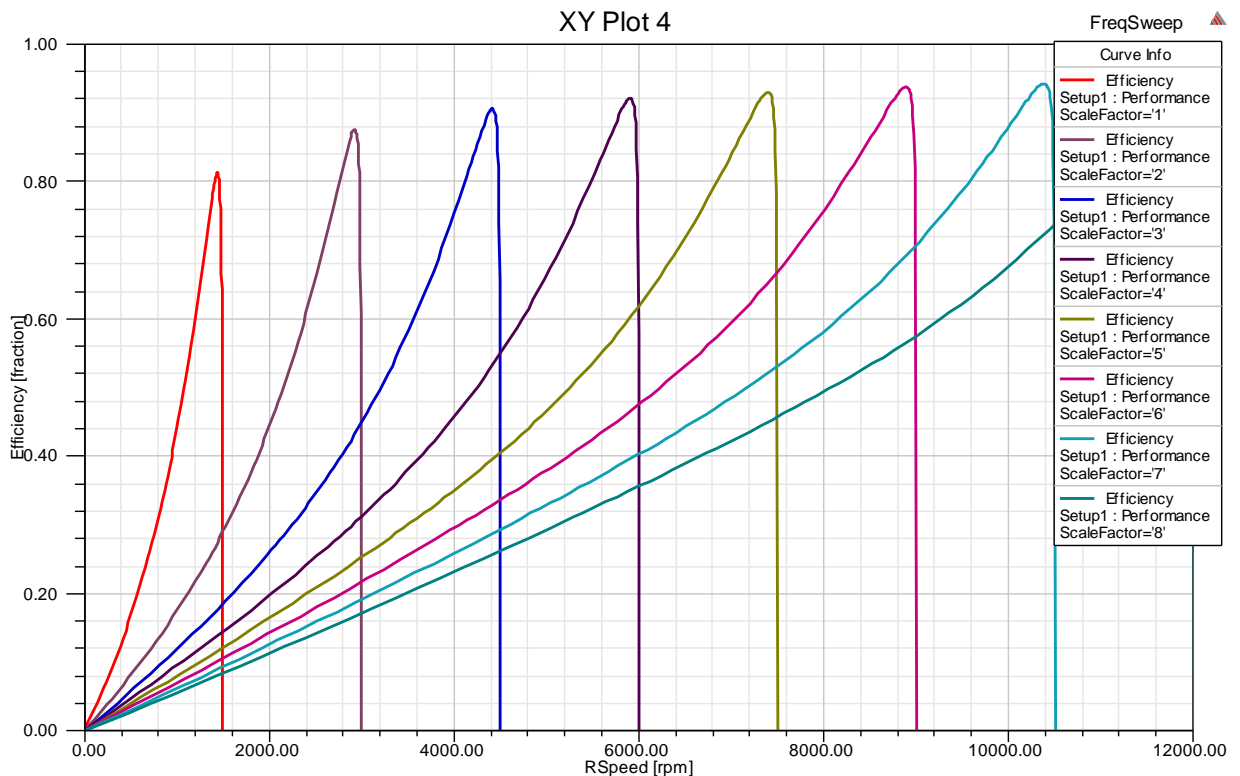


Рис. 7. Сімейство кривих залежності ККД η (%) електродвигуна від частоти обертання ротора n (об/хв) при варіаціях частоти $f = 50, 100 \dots 400$ Гц

З сімейства кривих для ККД η видно, що при значенні частоти обертання ротора близько 1200 об/хв ККД двигуна при різній частоті f різний, причому зі збільшенням частоти f він зменшується.

Висновки і перспективи. У програмі Ansys Maxwell RМхprt спроектований асинхронний електродвигун потужністю 15 кВт з номінальною частотою 1460 об/хв. Побудовані та проаналізовані його основні робочі характеристики, а саме залежності моменту двигуна M , фазного струму I та ККД η від частоти обертання ротора n , а також залежність моменту двигуна M від ковзання s . Проведений параметричний аналіз для моменту M та ККД η двигуна при варіаціях частоти в діапазоні від 50 до 400 Гц.

Список літератури

1. Анхимюк В.Л. Проектирование систем автоматического управления электроприводами / В.Л. Анхимюк, О.П. Ильин. – Мн.: Высш. шк., 1971. – 336 с.
2. Башарин А.В. Управление электроприводов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
3. Воробьев В.А. Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства / В.А. Воробьев. – М.: Колос, 2005. – 278 с.
4. Дайнеко В.А. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий / В.А. Дайнеко, А.И. Ковалинский. – М.: Новое знание, 2007. – 319 с.
5. Масандилов Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л.Б. Масандилов, В.В. Москаленко. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
6. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Академия, 2008. – 208 с.
7. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
8. Системы автоматизированного управления электроприводами / [Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова]. – Минск: Новое знание, 2007. – 394 с.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: «Академия», 2006. – 265 с.
10. Черпаков Б.И. Автоматизация и механизация / Б.И. Черпаков, Л.И. Вереина. – М.: Академия, 2004. – 384 с.
11. Austin Hughes. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications / Austin Hughes. – Oxford : Burlington: Elsevier, 2006. – 399 p.
12. Rik De Doncker. Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control / Rik De Doncker, Duco W.J. Pille, Andre Veltman. – Springer, 2011. - 474 p.

References

1. Anchymyuk, V. L., Ilyin, O. P. (1971). Proektyrovanye system avtomatycheskoho upravleniya elektropryvodamy [Design of automatic control systems for electric drives]. Minsk: Higher School, 336 .
2. Basharin, A. V., Novikov, V. A, Sokolovsky, G. G. (1982).Upravlenye elektropryvodov [Control of electric drives] Leningrad:: Energoizdat, 392.
3. Vorobiev, V. A. (2005). Elektryfikatsiya i avtomatyzatsiya selskokhoziaistvennogo proyzvodstva [Electrification and automation of agricultural production]. Moscow: Kolos, 278.
4. Daineko, V. A., Kovalinsky, A. I. (2007). Elektrooborudovanye selskokhoziaistvennykh predpriyatiy [Electric equipment of agricultural enterprises]. Moscow: New knowledge, 319 .
5. Masandilov, L. B., Moskalenko, V. V. (1978). Rehulyrovanye chastoty vrashcheniya asynkhronnykh dvyhatelei [Control of the frequency of rotation of asynchronous motors]. Moscow: Energy, 96 .
6. Ilyinsky, N. F., Moskalenko, V. V. (2008). Elektropryvod: enerho- y resursosberezhenye [Electric drive: energy and resource saving]. Moscow: Academy, 208.
7. Rudakov, V. V. (1987). Asynkhronnye elektropryvody s vektornym upravlenyem [Asynchronous electric drives with vector control]. Leningrad: Energoatomizdat, 136 .
8. Gul'kov, G. I., Petrenko, Yu. N., Ratkevich, E. P., Symonenkova, O. L. (2007). Systemy avtomatyzirovannogo upravleniya elektropryvodamy [Systems of automated control of electric drives].Minsk: New Knowledge, 394.
9. Sokolovsky, G. G. (2006). Elektropryvody peremennogo toka s chastotnym rehulyrovanyem [AC drives with frequency regulation].Moscow: Academy, 265.
10. Cherpakov, B. I., Verein, L. I. (2004). Avtomatyzatsiya y mekhanyzatsiya [Automation and Mechanization], Moscow: Academia, 384 .
11. Austin Hughes (2006). Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications . Oxford : Burlington: Elsevier, 399 .
12. Rik De Doncker, Duco W.J. Pulle, Andre Veltman (2011).Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control . Springer, 474 .

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ANSYS MAXWELL RMXprt

Г. Я. Клендий, П. Б. Клендий, А. П. Дударь

Аннотация. *Большая часть потребления электроэнергии в сельскохозяйственном производстве приходится на электроприводы, в частности в зерносушильном оборудовании. Электроприводы вентиляторов зерносушильных агрегатов комплектуются асинхронными электродвигателями и в подавляющем большинстве являются неавтоматизированными. Они не способны обеспечить современных требований к надежности и качества управления, их*

энергоэффективность является сравнительно низкой. Решить данную проблему позволяет автоматизация и разработка автоматизированных систем управления электроприводами вентиляторов. В качестве таких систем может быть использована система частотного управления со скалярным принципом управления и параболической зависимостью между напряжением и частотой питающей сети. Системы скалярного частотного управления широко используются для приводов вентиляторов и насосов, а векторное частотное управление используется для электроприводов с широким диапазоном регулирования. Эти системы являются энергоэффективными, а экономия электроэнергии при их использовании составляет до 30 %. Одной из тенденций в области энергосберегающих технологий последних лет является применение частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты, снижающих потребление электрической энергии, повышают степень автоматизации, удобство эксплуатации оборудования и качество технологических процессов. В составе частотно-регулируемого асинхронного электропривода выбор и согласование параметров преобразователя частоты и асинхронного короткозамкнутого двигателя является главным вопросом. Поскольку при изменении частоты вращения электропривода изменяются его энергетические показатели, то нужно определить рациональные параметры рабочих характеристик асинхронного двигателя. Для этого в программном обеспечении ANSYS MAXWELL RMXprt смоделирован асинхронный электродвигатель мощностью 15 кВт с номинальной частотой вращения 1460 об/мин. Построены и проанализированы его основные рабочие характеристики, а именно зависимости момента двигателя, фазного тока и КПД от частоты вращения ротора, а также зависимость момента двигателя от скольжения. Проведен параметрический анализ для момента и КПД двигателя при вариациях частоты в диапазоне от 50 до 400 Гц.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, программного обеспечения ANSYS MAXWELL RMXprt, частотный преобразователь, энергоэффективность

COMPUTER SIMULATION OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR OF THE GRAIN DRYER UNIT WITH THE USE OF ANSYS MAXWELL RMXprt SOFTWARE

G. Klendiy, P. Klendiy, O. Dudar

Abstract. A large share of electricity consumption in agricultural production falls on electric drives, in particular, in grain drying equipment. The electric drives of the fans of grain drying units are equipped with asynchronous motors and in the overwhelming majority they are non-automatic. They are not able to provide modern requirements for reliability and quality of management, their energy efficiency is relatively low. Automation and development of automated control systems of electric drives of fans allows to solve this problem. As such systems, a frequency control system with a scalar control principle and a parabolic relationship between the voltage and the frequency of the feeding network

can be used. Scalar frequency control systems are widely used for fan drives and pumps, and vector frequency control is used for electric drives with a wide range of regulation. These systems are energy-efficient, and energy saving in their use is up to 30%. One of the tendencies in the field of energy saving technologies of recent years is the use of frequency-controlled drives based on asynchronous short-circuited electric motors and semiconductor frequency converters, which reduce the consumption of electric energy, increase the degree of automation, convenience of operation of equipment and quality of technological processes. As part of a frequency-regulated asynchronous electric drive, the choice and matching of the parameters of the frequency converter and the asynchronous short-circuited engine is the main issue. Since, when changing the frequency of the electric drive, its energy parameters change, then it is necessary to determine the rational parameters of the performance of the asynchronous motor. To do this, an ANSYS MAXWELL RMXPRT software simulates an asynchronous 15 kW motor with a nominal frequency of 1460 rpm. Its main operating characteristics have been constructed and analyzed, namely, depending on the moment of the engine, the phase current and the efficiency of the rotor speed, as well as the dependence of the engine moment on the slip. A parametric analysis was performed for the moment and engine efficiency at variations of the frequency from 50 to 400 Hz.

Key words: *asynchronous engine, software ANSYS MAXWELL RMXPRT, frequency converter, energy efficiency*