

УДК 621:313

## ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ЦЕПИ ФАЗНОГО РОТОРА

**А. В. Качура, М. В. Кулик, А. М. Съянов**

Днепродзержинский государственный технический университет

ул. Днепростроевская, 2-а, г. Днепродзержинск, 51918, Украина. E-mail: fem@ukr.net

На основе экспериментальных данных исследования электромагнитных параметров индукционных сопротивлений с ферромагнитными элементами разработана математическая модель асинхронного двигателя с преобразователем частоты в цепи фазного ротора. Данная модель позволила исследовать влияние частоты тока ротора на величину нелинейного сопротивления, включаемого в роторную цепь. Управление частотой тока ротора позволяет формировать требуемые механические характеристики асинхронного двигателя и создает реальные предпосылки для снижения массогабаритных показателей нелинейных сопротивлений.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с фазным ротором, преобразователь частоты, нелинейное сопротивление, роторная цепь, математическая модель.

## ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ У КОЛІ ФАЗНОГО РОТОРА

**О. В. Качура, М. В. Кулик, О. М. С'янов**

Дніпродзержинський державний технічний університет

вул. Дніпростріївська, 2-а, м. Дніпродзержинськ, 51918, Україна. E-mail: fem@ukr.net

На основі експериментальних даних дослідження електромагнітних параметрів індукційних опорів з феромагнітними елементами створено математичну модель асинхронного двигуна з перетворювачем частоти у колі фазного ротора. Дана модель дозволила дослідити вплив частоти струму ротора на величину нелінійного опору, що вмикається у коло ротора. Керування частотою струму ротора дозволяє формувати необхідні механічні характеристики асинхронного двигуна та створює реальні умови для зниження масогабаритних показників нелінійних опорів.

**Ключові слова:** асинхронний двигун з фазним ротором, перетворювач частоти, нелінійний опір, роторне коло, математична модель.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Задача повышения надежности подъемно-транспортного оборудования в современных экономических условиях является чрезвычайно важной и актуальной. Значительная часть кранового парка, который эксплуатируется на предприятиях различных отраслей, как правило, изношена и устарела. Особого внимания заслуживают механизмы подъема и перемещения, функционирующие в условиях ударных нагрузок, повышенной вибрации, колебаний температуры, загазованности и т.п. В большинстве случаев это приводит к частым ремонтам и систематическим простоям оборудования. В связи с этим к электрооборудованию крановых механизмов выдвигается ряд основных требований: высокая отказоустойчивость, простота обслуживания, умеренная цена.

Большинству данных требований отвечают электроприводы (ЭП) на переменном токе, которые комплектуются асинхронными двигателями (АД) с фазным ротором и нелинейными сопротивлениями (НС) в роторной цепи. В качестве последних часто используются индукционные реостаты (ИР), что позволяет избежать применения ступенчатой системы коммутации пусковых сопротивлений в роторе. Кроме того, ИР обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой, что дает возможность получить механическую характеристику АД экскаваторного типа.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Анализу влияния сопротивления в цепи фазного ротора на характеристики АД посвящен ряд работ [1, 2], в которых электромагнитные процессы описываются уравнениями потокосцеплений на основе законов Кирхгофа. В результате получают эквива-

лентные схемы замещения, где ИР представляются совокупностью сопротивлений намагничивания и рассеяния. В работах [3, 4] представлены результаты исследования АД с ИР на основе метода конечных элементов в цепи-полевой постановке.

Все вышеописанные подходы упрощают определение нелинейных параметров ИР и позволяют получить характеристики АД в пределах определенной точности. К сожалению, в процессе поиска оптимальных конструкций ИР, обладающих требуемыми характеристиками, разработчикам, как правило, приходится “жертвовать” их массогабаритными показателями, что на практике приводит к увеличению веса и размеров дополнительно на десятки и даже сотни килограммов.

Одним из вариантов решения указанной проблемы может быть создание малогабаритных конструкций ИР, питаемых преобразователем частоты (ПЧ) в цепи фазного ротора АД. Структурная схема предлагаемой системы показана на рис. 1.

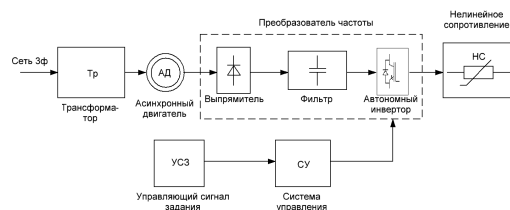


Рисунок 1 – Структурная схема включения НС в цепь фазного ротора

В упрощеному вигляді в реальній системі координат АД може бути описан системою диференціальних рівнянь в матричній формі [4]:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} R_{01} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} R'_{02}(i) + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix},$$

где  $u_i$  – миттєвні значення фазних напруг;  $R_{01}, R'_{02}$  – активні опору фаз;  $\Psi_i$  – повні потокозчеплення фаз.

Потокозчеплення статора і ротора:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} L_s + \begin{bmatrix} i_B + i_C \\ i_C + i_A \\ i_A + i_B \end{bmatrix} M_s + \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} M_{sr}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} L_r + \begin{bmatrix} i_c + i_b \\ i_c + i_a \\ i_a + i_b \end{bmatrix} M_r + \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} M_{sr},$$

где  $L_s, M_s, M_{sr}, L_r, M_r, M_{sr}, C_s$  і  $C_r$  визначені в [4].

В преобразователі частоти електромагнітні процеси залежать від ряду факторів: з'єднання навантаження, її характеру, алгоритму переключення вентилей, схеми інвертора. Розглянемо модель преобразователя зі зчепленням постійного струму. При з'єднанні навантаження по схемі “зірка” і комутації ключей інвертора з мінімальною частотою графік напруги представляє собою знакоперемінну імпульсну функцію виду (фаза “а”):

$$u_a(\theta) = \begin{cases} +\frac{1}{3}u_n, & 0 < \theta < \frac{\pi}{3}; \\ +\frac{2}{3}u_n, & \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3}; \\ +\frac{1}{3}u_n, & \frac{2\pi}{3} < \theta < \pi; \end{cases}$$

где  $u_n$  – напруга джерела живлення інвертора;  $\theta = \Omega_s t$  – час в кутових одиницях, визначається частотою  $\Omega_s$  вихідного напруги інвертора.

Если навантаження преобразователя з'єднана трикутником, алгоритм формування лінійного напруги має вигляд:

$$u_{ab}(\theta) = \begin{cases} +u_n, & 0 < \theta < \frac{2\pi}{3}; \\ 0, & \frac{2\pi}{3} < \theta < \pi; \\ -u_n, & \pi < \theta < \frac{5\pi}{3}; \\ 0, & \frac{5\pi}{3} < \theta < 2\pi. \end{cases}$$

Навантаженням преобразователя частоти є НС, математична модель якого може бути побудована на основі експериментальних даних,

полученных при исследовании ИР с массивными ферромагнитными пластинами (рис. 2,а). Данная конструкция проста в изготовлении, имеет полное экранирование фаз обмоток и форму радиального сечения в виде прямоугольника (рис. 2,б). Полное сопротивление ИР определялось при изменении частоты питающего напряжения от 5 до 100 Гц с токовым диапазоном 20–100 А. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

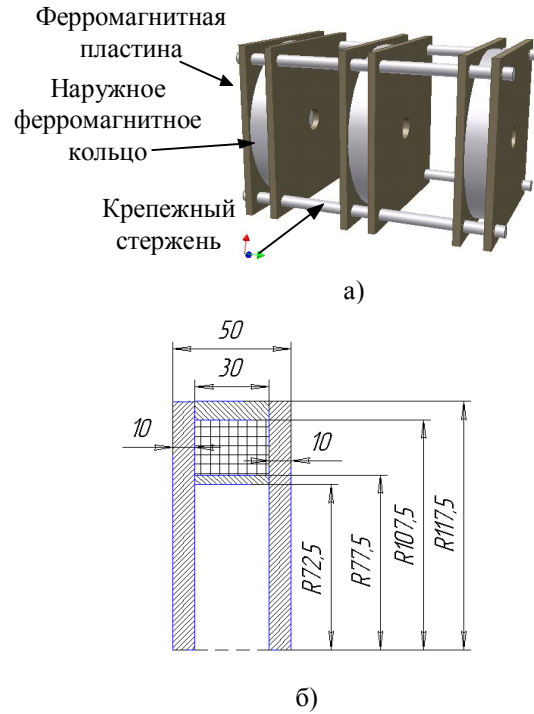


Рисунок 2 – ИР с ферромагнитными пластинами

Таблица 1 – Электромагнитные параметры ИР

f, Гц	Z, Ом		
	20 А	50 А	100 А
5	0,5	0,28	0,2
50	1,9	1,4	1,0
100	3,4	2,4	1,6

По данным табл. 1 построена плоскость сопротивления (рис. 3), описываемая аппроксимирующим полиномом вида

$$Z(i, f) = \frac{(a + b \ln(i) + c \ln(f) + d (\ln(f))^2)}{(1 + e \ln(i) + f (\ln(i))^2 + g \ln(f) + h (\ln(f))^2)},$$

где  $Z(i, f)$  – функция полного сопротивления, зависящая от тока и частоты;  $i$  – величина тока в роторе;  $f$  – частота тока;  $a, b, c, d, e, f, g, h$  – постоянные коэффициенты.

Разработанная математическая модель послужила основой при создании имитационной модели АД–ПЧ–НС, которая позволяет исследовать характеристики крановых АД с НС в цепи фазного ротора при питании последних от преобразователя частоты. Схема модели показана на рис. 4.

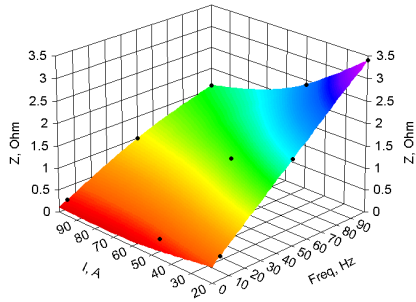


Рисунок 3 – Плоскость НС

Моделирование выполнено для кранового АД МТВ-412-8 ( $P_{НОМ}=22$  кВт;  $n_{НОМ}=720$  об/мин;  $\cos\varphi=0,69$ ;  $\eta=0,83$  %;  $I_{НОМ}=58$  А,  $J=3$  кгм<sup>2</sup>) при включении обмоток НС звездой. Частота питающего напряжения в роторе изменялась от 200 до 2 Гц на

временном интервале 0–2 с с шагом 10 Гц.

На основе результатов исследования построены графики переходных процессов тока ротора, электромагнитного момента, скорости, а также график изменения НС в роторе в зависимости от частоты питающего тока (рис. 5).

**ВЫВОДЫ.** Включение преобразователя частоты в роторную цепь позволяет управлять величиной НС в зависимости от режима работы АД, что создает реальные предпосылки для снижения массогабаритных показателей ИР. Разработанная математическая модель показывает, что изменение частоты питающего тока в роторной цепи АД МТВ-412-8 от двух до 200 Гц приводит к расширению диапазона изменения НС, который составляет 0,45–7,6 Ом и позволяет существенно ограничить величину пусковых токов крановых АД.

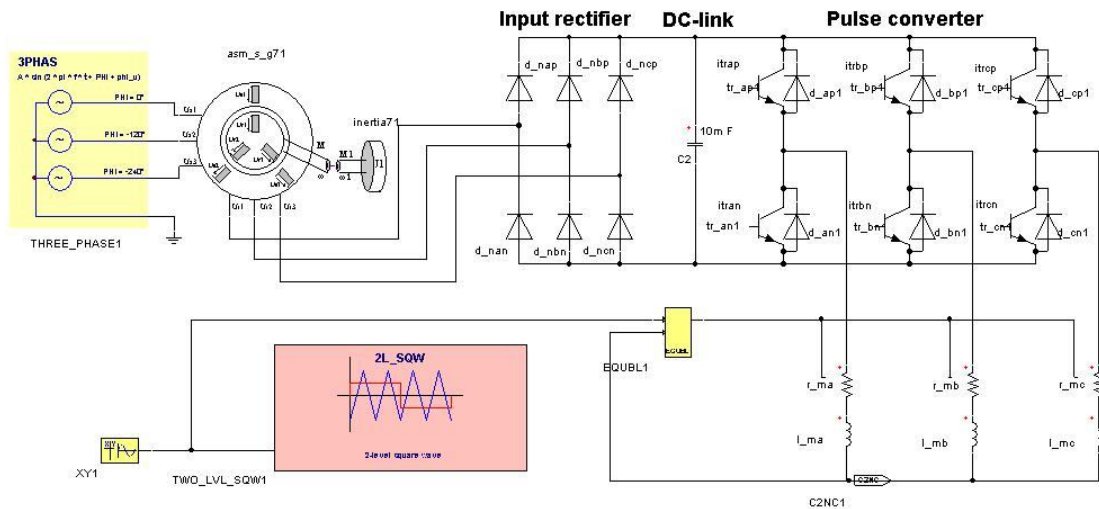


Рисунок 4 – Имитационная модель АД–ПЧ–НС

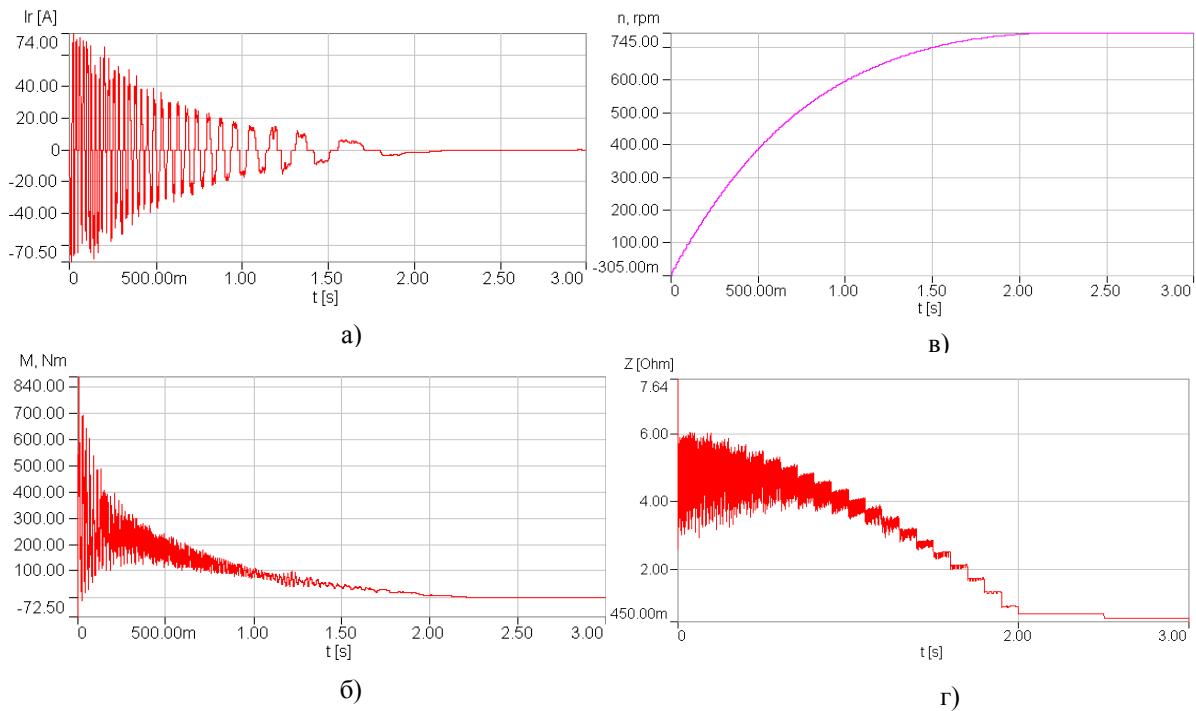


Рисунок 5 – Графики переходных процессов

ЛИТЕРАТУРА

1. Тигунов А.П. Расчет параметров индукционных сопротивлений и характеристик регулируемого асинхронного двигателя: автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 1983. – 22 с.
2. Власов В.Г. Бесконтактные асинхронные двигатели с индукционными частотно зависимыми сопротивлениями в цепи ротора: автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 1970. – 18 с.
3. Качура А.В., Сьянов А.М. Методика расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей с

индукционными реостатами с учетом их взаимного влияния // Сборник трудов Севастопольского национального технического университета. – Севастополь, 2005. – С. 44–45.

4. Качура А.В., Колычев С.В., Сьянов А.М. Проектирование электроприводов на основе совместного анализа цепевых и полевых моделей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006 (38). – С. 17–19.

**INVESTIGATION OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH NONLINEAR ELEMENT IN THE CHAIN SLIP-RING MOTORS**

**A. Kachura, M. Kulik, A. Syanov**

Dneprodzerzhinsk State Technical University

ul. Dneprostroyevskaya, 2-a, Dneprodzerzhinsk, 51918, Ukraine. E-mail: fem@ukr.net

On the basis of experimental data, the study of electromagnetic induction resistivity parameters of the ferromagnetic elements of the mathematical model of induction motor with frequency converter circuit in the phase of the rotor. This model allowed to investigate the effect of the rotor current frequency on the magnitude of the nonlinear resistance, included in the rotor circuit. Rotor current frequency control allows to create the desired mechanical characteristics of the induction motor and creates real prerequisites for reducing the weight and size parameters of nonlinear resistors.

**Key words:** asynchronous motor with slip-ring motors, frequency converter, the nonlinear resistance, the rotor circuit, the mathematical model.

REFERENCES

1. Tiginov A.P. *Calculation of the resistance induction and characteristics of the controlled induction motor*: dis. Candidate tech. science. – K., 1983. – 22 p. [in Russian]
2. Vlasov V.G. *Contactless induction asynchronous motors with frequency dependent resistances in the rotor circuit*: dis. Candidate tech. science. – K., 1970. – 18 p. [in Russian]
3. Kachura A.V., Syanov A.M. Methods of calculating the starting characteristics of asynchronous induction motors with rheostats, taking into account their mutual influence // *Proceedings of the Sevastopol National Technical University*. – Sevastopol, 2005. – PP. 44–45. [in Russian]

4. Kachura A.V., Kolychev S.V., Syanov A.M. Design of actuators on the basis of joint analysis chains and field models // *Bulletin of the KDPU*. – Kremenchuk, 2006. – Iss. 3/2006 (38). – PP. 17–19. [in Russian]

Стаття надійшла 11.06.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.