

ЧИСЛЕННЫЙ БЕЗИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

- ПАТАЛАХ Д.Г. аспирант кафедры теоретической и общей электротехники Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com*;
- ТИХОВОД С.М. д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: stikhovod@gmail.com*;
- КОРНУС Т.М. ст. преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: tmkornus@gmail.com*.

Цель работы. Разработка безытерационного метода расчета переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях.

Методы исследования. Численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, программирование.

Полученные результаты. Поскольку в систему уравнений, описывающих динамику асинхронного двигателя, входят произведения токов ротора и статора и произведение частоты вращения ротора и токов, то эта система нелинейная. Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений предполагает итерационный процесс на каждом шаге интегрирования. Этот итерационный процесс может быть длительным и плохо сходящимся, что замедляет процесс расчета. Предложено усовершенствование численного метода, устраняющее итерационный процесс и сокращающее время моделирования. Усовершенствованный численный метод применен для интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих динамику электромагнитных и электромеханических асинхронного двигателя.

Научная новизна. Предложено усовершенствование численного метода, позволяющее выполнять численное интегрирование дифференциальных уравнений, содержащих произведения функций, что позволяет избежать итерационного процесса на каждом шаге интегрирования и сократить время моделирования.

Практическая ценность. На основании предложенной методики может быть разработана универсальная программа моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях, имеющая преимущество по быстройдействию.

Ключевые слова: электромеханические процессы; асинхронные двигатели; численные методы; дифференциальные уравнения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Переходные электромагнитные и электромеханические процессы в электротехнических системах представляют опасность для оборудования, поэтому исследование этих процессов актуально [1]-[4]. Для машин нестандартного, специализированного исполнения и машин общепромышленного применения, у которых динамический режим в процессе эксплуатации является определяющим (частые пуски, реверсы, повторные включения), необходим учет динамических режимов на стадии проектирования [5], [6].

Моделирование переходных электродинамических и электромеханических процессов в асинхронных двигателях (АД) сводится к составлению системы уравнений состояния и ее численному решению [6]-[8]. В систему уравнений АД входят произведения токов ротора и статора и произведение частоты вращения ротора и токов, поэтому эта система нелинейная [8]-[10]. Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений предполагает итерационный процесс на каждом шаге интегрирования [7], [8]. Этот итерационный процесс может быть длительным и плохо сходящимся, что замедляет процесс расчета [9]-[13].

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Моделированию переходных электродинамических процессов в асинхронных двигателях посвящено много публикаций, например, [6]-[13]. Достаточно работ посвящено вычислению параметров моделей, например, [14]-[18].

В большинстве работ вычислительному механизму не уделяется достаточного внимания. Используются встроенные решатели в автоматизированные системы моделирования. Решатели автоматизированных комплексов моделирования, таких, как OrCAD Pspice [19] или MATLAB [20] используют традиционные методы численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений с использованием итерационного процесса на каждом шаге интегрирования. Это замедляет процесс численного расчета.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка безытерационного метода расчета переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях, в результате чего может быть сокращено время моделирования.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование процессов в асинхронном двигателе проведем, используя уравнения состояния для двухфазного двигателя в системе координат dq , вращающейся с угловой частотой вращения ротора. В статоре рассматриваются две обмотки, расположенные друг к другу под углом 90° as и bs . В роторе также рассматриваются также две обмотки ar и br . Двигатель конденсаторный, поэтому две фазы двигателя питаются от одной фазы трансформатора.

Схема замещения двухфазного АД приведена на рис. 1 [6]. На этой схеме пятый контур иллюстрирует динамику механической части двигателя – ротора. В этом контуре роль тока исполняет круговая частота вращения ротора w . Роль индуктивности исполняет эквивалентный момент инерции ротора с присоединенной нагрузкой, деленный на количество пар полюсов. Электромагнитный и тормозной моменты представлены, как источники ЭДС, а тормозное сопротивление задано резистивным элементом R_t .

Для схемы замещения двухфазного конденсаторного АД система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, имеет вид [6]:

$$\left. \begin{aligned} e(t) &= (L_m + L_s) \frac{di_{as}}{dt} + R_s i_{as} + L_m \frac{di_{ar}}{dt}; \\ 0 &= L_m \frac{di_{as}}{dt} + R_r i_{ar} + (L_m + L_r) \frac{di_{ar}}{dt} + \\ &+ w L_r i_{br} + w L_m P i_{bs}; \\ e(t) &= (L_m + L_r) \frac{di_{bs}}{dt} + R_s i_{bs} + L_m \frac{di_{br}}{dt} + u_{Cp}; \\ 0 &= -w L_m P i_{as} - w (L_m + L_r) P i_{ar} + \\ &+ (L_m + L_r) \frac{di_{br}}{dt} + R_r i_{br} + L_m \frac{di_{bs}}{dt}; \\ C_p \frac{du_{Cp}}{dt} - i_{bs} &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

где $i_{as}, i_{bs}, i_{ar}, i_{br}$ – токи в обмотках статора и ротора фаз «а» и «b»; w – частота вращения ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток; L_s, L_r – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; $e(t)$ – ЭДС источника питания; u_{Cp} – напряжение на фазосдвигающем конденсаторе C_p .

К системе (1) следует присоединить уравнение динамики ротора:

$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} w + R_t w + M_t = k e \cdot [i_{bs} i_{ar} - i_{as} i_{br}], \quad (2)$$

где M_t – внешний момент, приложенный к валу ЭМ; R_t – тормозное сопротивление ротора; $k e = P \cdot m \cdot L_m / 2$; P – число пар полюсов; m – число фаз обмотки статора; J – приведенный момент инерции вращающихся частей машины и связанных с ними тел.

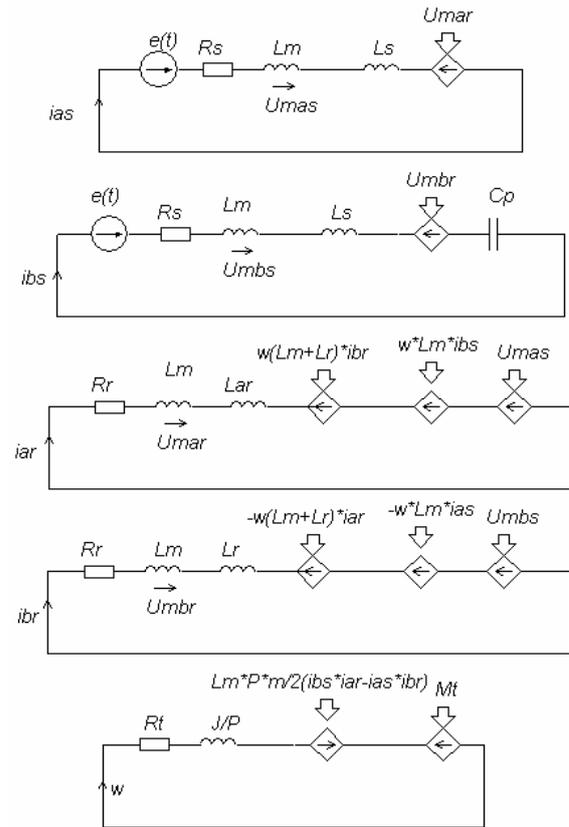


Рисунок 1. Схема замещения двухфазного АД

Систему уравнений (1,2) будем решать численным неявным методом Эйлера.

Выполним модификацию неявного метода Эйлера так, чтобы за один цикл можно было вычислить на новом $(k+1)$ шаге интегрирования не только значения искомых функций, но и произведения этих функций.

Пусть в некоторое обыкновенное дифференциальное уравнение входит произведение двух функций $x(t)$ и $y(t)$. Тогда, согласно неявному методу Эйлера имеем:

$$(xy)_{k+1} = (xy)_k + h(xy)'_{k+1}. \quad (3)$$

В уравнении (3) преобразуем второе слагаемое правой части:

$$(xy)' = xy' + x'y. \quad (4)$$

Согласно (4) имеем:

$$\begin{aligned} (xy)'_{k+1} &= x_{k+1}y'_{k+1} + x'_{k+1}y_{k+1} = \\ &= (x_k + hx'_{k+1})y'_{k+1} + (y_k + hy'_{k+1})x'_{k+1} \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая выражение (5), уравнение (3) примет вид:

$$(xy)_{k+1} = (xy)_k + hy_k x'_{k+1} + hx_k y'_{k+1} + 2h^2 x'_{k+1} y'_{k+1} \quad (6)$$

Пренебрегая в (6) последним слагаемым, содержащим h^2 , получим окончательно:

$$(xy)_{k+1} - hy_k x'_{k+1} - hx_k y'_{k+1} = (xy)_k. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет вычислить произведение функций $x(t)$ и $y(t)$ на новом шаге интегрирования исходя из известных значений функций на предыдущем шаге интегрирования.

Уравнение, аналогичное (7), можно получить исходя не только из метода Эйлера, но и из какого-нибудь другого многошагового метода, например, метода Гира второго порядка:

$$x_{k+1} - \frac{2}{3}hx'_{k+1} = \frac{4}{3}x_k - \frac{1}{3}x_{k-1}$$

$$(xy)_{k+1} - \frac{2}{3}h(xy)'_{k+1} = \frac{4}{3}(xy)_k - \frac{1}{3}(xy)_{k-1}$$

При этом точность метода повышается.

Рассмотрим вектор-столбец, содержащий следующие переменные:

$$M_d = \begin{bmatrix} w' & ias' & ibs' & iar' & ibr' & uc' & w & ias & ibs & iar & ibr & uc & ias.ibr & ibs.iar \\ Lm+ & & Lm & & & & Rs & & & & & & & \\ +Ls & & & & & & & & & & & & & \\ Lm & & Lm+ & & & & w \cdot Lm & Rr & & w(Lm+ & & & & \\ +Lr & & +Lr & & & & & & & +Lr) & & & & \\ Lm+ & & & & Lm & & Rs & & & & & 1 & & \\ +Ls & & & & +Lr & & & & & & & & & \\ Lm & & & & Lm+ & & & & -w(Lm+ & Rr & & & & \\ +Lr & & & & +Lr & & & & +Lr) & & & & & \\ Cp & & & & & & -1 & & & & & & & \\ J/P & & & & & & Rt & & & & & & ke & -ke \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$F_d = [e(t) \quad | \quad | \quad e(t) \quad | \quad | \quad | \quad -M_t]^T \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} w' & ias' & ibs' & iar' & ibr' & uc' & w & ias & ibs & iar & ibr & uc & ias.ibr & ibs.iar \\ -h & & & & & & 1 & & & & & & & \\ & -h & & & & & & 1 & & & & & & \\ & & -h & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & -h & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & -h & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & -h & & & & & & 1 & & \end{bmatrix} \cdot X_d = \begin{bmatrix} w \\ ias \\ ibs \\ iar \\ ibr \\ uc \end{bmatrix}_k \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -h \cdot ibr & & & & & & & & & & & & & 1 \\ & -h \cdot ibr & & & & & & & & & & & & \\ & & -h \cdot ibr & & & & & & & & & & & \\ & & & -h \cdot ibr & & & & & & & & & & \\ & & & & -h \cdot ibr & & & & & & & & & \\ & & & & & -h \cdot ibr & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}_k \cdot X_d = \begin{bmatrix} ias \cdot ibr \\ ibs \cdot iar \end{bmatrix}_k \quad (13)$$

Учитывая, что частота вращения ротора w изменяется медленно, в уравнении (9) будем использовать ее значение предыдущего шага интегрирования. Таким образом, объединенная система уравнений (9), (12), (13) содержит 14 уравнений и имеет единственное решение – вектор неизвестных (8). Таким образом, объединенная система уравнений (9), (12), (13) позволяет вычислить значения всех неизвестных токов и производных переменных состояния в текущий момент времени, если известны значения переменных состояния в момент предыдущего шага интегрирования.

Если систему уравнений (9), (12), (13) решать в

$$X_d = [w' \ ias' \ ibs' \ iar' \ ibr' \ uc' \ w \ ias \ ibs \ iar \ ibr \ uc \ ias.ibr \ ibs.iar]^T; \quad (8)$$

Система уравнений (1,2) в матричной форме приобретает вид;

$$M_d \cdot X_d = F_d, \quad (9)$$

где матрица M_d имеет вид (10), а вектор правых частей F_d имеет вид (11).

Система уравнений (1,2), рассмотренная на текущем $k+1$ шаге интегрирования, имеет 14 неизвестных, но содержит только 6 уравнений. Чтобы ее решить, нужно добавить уравнения численного метода Эйлера (12). Добавим также два уравнения численного метода (7) для произведения токов (13).

цикле с пошаговым увеличением текущего времени до достижения заданного времени моделирования, то получим зависимости от времени всех токов и производных переменных состояния. Совокупность вектор-столбцов решения X_d , полученных для всех моментов времени, изменяющихся с шагом h , объединяется в единый массив решений X .

По приведенной методике разработана компьютерная программа в системе GNU Octave [19], совместимой с системой MATLAB [20], и выполнены расчеты разгона двухфазного конденсаторного двигателя мощностью 500 Вт. Временные зависимости тока статора и частоты вращения ротора приведены на рис. 2

и рис. 3. Разработана также компьютерная программа расчета разгона этого же двигателя методом Эйлера с традиционным использованием итерационных процессов на каждом шаге интегрирования.

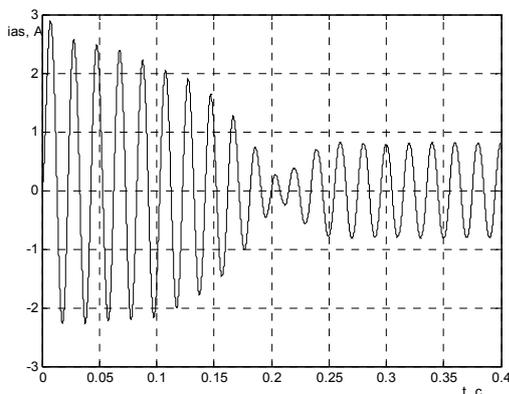


Рисунок 2. Зависимость от времени тока статора фазы «А»

Сравнение результатов расчета разными методами показало, что при одинаковой точности время расчета по предложенной методике в полтора раза сокращается.

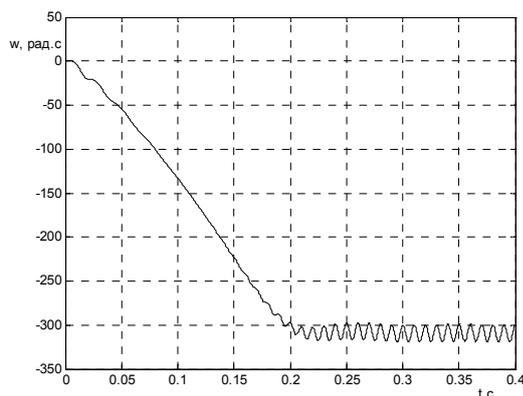


Рисунок 3. Зависимость от времени частоты вращения ротора

В. ВЫВОДЫ

Использованный метод расчета переходных электромеханических процессов в асинхронном двигателе позволяет ускорить процесс моделирования в полтора раза и сделать оптимальный выбор параметров оборудования. При этом могут быть смоделированы режимы пуска, торможения, изменения напряжения питания, сброса и наброса нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Пивняк Г.Г. Переходные процессы в системах электроснабжения / Г.Г. Пивняк, В.Н. Винославский. – М.: Энергоатомиздат, Днепропетровск, Национальный горный университет, 2003. - 548 с.
- [2]. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Вени-

ков. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

- [3]. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета токов короткого замыкания мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // Электротехника та електроенергетика. - 2012. - № 1. - С. 23-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2012-1-6
- [4]. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. – Севастополь. 2014. – С. 131 – 136.
- [5]. Коцур М.И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / И.М. Коцур // Электротехніка та електроенергетика. – 2014. - № 1. – С. 32 – 36. DOI:10.15588/1607-6761-2014-1-5
- [6]. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: ВШ. – 2001. – 327 с.
- [7]. Васьковский Ю. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора [Текст] / Ю. В. Васьковский, А. А. Гераскин // Техническая электродинамика. – 2010 – № 2. – С. 56 – 61.
- [8]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12.
- [9]. Могильников В.С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение [Текст] / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. –120с.
- [10]. Плюгин, В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором [Текст] / В.Е. Плюгин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 51 (1024) – С. 66 – 75.
- [11]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания/ Д.С. Ярымбаш, М.И. Коцур, С.Т. Ярымбаш, И.М. Коцур // Электротехніка та електроенергетика №1, 2017, с.24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4.
- [12]. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехніка та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.
- [13]. Пустоветов М. Компьютерное моделирование

- асинхронних двигателів і трансформаторів / М. Пустоветов, К. Солус, И. Синявский.- LAP LAMBERT.- 2013.- 206 с.
- [14]. Персова М.Г. О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования [Текст] / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, З.С. Темлякова и др. // Электротехника. – 2007. - № 9. – С. 15 -21.
- [15]. Makeev M. S. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Makeev, А.А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 1. – С. 108-112.
- [16]. Мощинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным [Текст] / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество - 1998. - №4/98. - С. 38-42
- [17]. Кеон Д. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей / Дж. Кеон. – СПб.: Питер. – 2008. – 640 с.
- [18]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока/ Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехніка та електроенергетика №2, 2010, С.36-43.
- [19]. GNU Octave [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.gnu.org/software/octave/index.html
- [20]. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 16.12.2017

ЧИСЛОВИЙ БЕЗІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

- ПАТАЛАХ Д.Г. аспірант кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Україна, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- ТИХОВОД С.М. д-р техн. наук, доцент, кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Україна, e-mail: stikhovod@gmail.com;
- КОРНУС Т.М. ст. викладач кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Україна, e-mail: tmkornus@gmail.com

Мета роботи. Розробка безітераційного методу розрахунку перехідних електромагнітних і електромеханічних процесів в асинхронних двигунах.

Методи дослідження. Числові методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, програмування.

Отримані результати. Оскільки в систему рівнянь, що описують динаміку асинхронного двигуна, входять добутки струмів ротора і статора і добуток частоти обертання ротора і струмів, то ця система нелінійна. Числовий розв'язок нелінійних диференціальних рівнянь передбачає ітераційний процес на кожному кроці інтегрування. Цей ітераційний процес може бути тривалим і погано збігатися, що уповільнює процес розрахунку. Запропоновано удосконалення числового методу, що усуває ітераційний процес і скорочує час моделювання. Вдосконалено числовий метод застосований для інтегрування диференціальних рівнянь, що описують динаміку асинхронного двигуна.

Наукова новизна. Запропоновано удосконалення числового методу, що дозволяє виконувати числове інтегрування диференціальних рівнянь, які містять добуток функцій, що дозволяє уникнути ітераційного процесу на кожному кроці інтегрування і скоротити час моделювання.

Практична цінність. На підставі запропонованої методики може бути розроблена універсальна програма моделювання електромеханічних процесів в асинхронних двигунах, що має перевагу по швидкодії. асинхронних двигунах, що має перевагу по швидкодії.

Ключові слова: електромеханічні процеси; асинхронні двигуни; числові методи; диференційне рівняння

NUMERICAL WITHOUT ITERATION METHOD OF MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ENGINES

- PATALAKH D. Postgraduate student, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- TYKHOVOD S. ScD, Assoc. Prof., Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: stikhovod@gmail.com;
- KORNUS T. Senior Lecture of the department of the electrical and electronic apparatus, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tmkornus@gmail.com

Purpose. Development of calculation of electromagnetic and electromechanic transients is in asynchronous en-

gines without iterations.

Methodology. Numeral methods of integration of usual differential equations, programming.

Findings. As the system of equations, describing the dynamics of asynchronous engine, contains the products of rotor and stator currents and product of rotation frequency of rotor and currents, so this system is nonlinear one. The numeral solution of nonlinear differential equations supposes an iteration process on every step of integration. Time-continuing and badly converging iteration process may be the reason of calculation slowing. The improvement of numeral method by the way of an iteration process removing is offered. As result the modeling time is reduced. The improved numeral method is applied for integration of differential equations, describing the dynamics of asynchronous engine.

Originality. The improvement of numeral method allowing to execute numeral integrations of differential equations containing product of functions is offered, that allows to avoid an iteration process on every step of integration and shorten modeling time.

Practical value. On the basis of the offered methodology the universal program of modeling of electromechanics processes in asynchronous engines could be developed as taking advantage on fast-acting.

Keywords: electromechanics processes; asynchronous engines; numeral methods; differential equations.

REFERENCES

- [1]. Pivnyak G.G., Vinoslavskiy V.N. (2003). Perekhodnyye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya. Moscow, Energoatomizdat, 548. (in Russian)
- [2]. Venikov V.A. (1985). Perekhodnyye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh. Moscow, Vysshaya shkola, 536. (in Russian)
- [3]. Yarymbash, D. (2012). Features of the short-circuit current calculations of the ac graphitization power electrical complex. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 23-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2012-1-6. (in Russian)
- [4]. Yarymbash, D. (2014). The features of the calculation of electrodynamic stability of laminated bus packages of low-voltage circuit of graphitization furnace. *Visnyk SevNTU: Seriya: Mekhanika. Enerhetyka. Ekologiya*. 146, 131-136. (in Russian)
- [5]. Kotsur, M. (2014). Features of the of thermal effect impact on the asynchronous motor with the modified pulse control system in conditions of frequent starts. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 32-36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5
- [6]. Kopylov I.P. (2001). Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin. Moscow, Vysshaya shkola, 327. (in Russian)
- [7]. Vaskovskiy, Yu. V., Geraskin A. A. (2012) Mathematical modeling of electromagnetic fields in the squirrel cage induction motor with damaged rotor winding, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 2. 56 – 61. (in Russian)
- [8]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1 (in Russian)
- [9]. Mogilnikov B. C., Oleynikov A. M., Strelnikov A. N. (1983) Asinhronnyie dvigateli s dvuhsloynnyim rotorem i ih primenenie, Moscow, Energoatomizdat, 120. (in Russian)
- [10]. Plyugin, V. E. (2013) Numerical simulation of the electromagnetic field of the induction motor with the external massive rotor, *Vestnik NTU «KHPI»*, 51(1024), 66 – 75. (in Russian)
- [11]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4. (in Russian)
- [12]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5. (in Russian)
- [13]. Pustovetov M. Kompyuternoye modelirovaniye asinhronnykh dvigateley i transformatorov / M. Pustovetov. K. Solus. I. Sinyavskiy.- LAP LAMBERT.- 2013.- 206 c. (in Russian)
- [14]. Persova M. G., Soloveychik Yu. G., Temlyakova Z. S. (2007) A new approach to the design of electrical machines based on numerical simulation, *Elektrotehnika*, 9, 15–21. (in Russian)
- [15]. Makeyev M.S., Kuvshinov A.A. (2013). Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of the asynchronous engine at the catalog data. *Vektor nauki TGU*, 1 (23), 108-112. (in Russian)
- [16]. Moshchinskiy Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A. A. (1998). Ascertainment of the equivalent circuit parameters of the asynchronous machine at the catalog data. *Elektrichestvo*, 4/98, 38-42 (in Russian)
- [17]. Keoun D. (2008). OrCAD Pspice. Analiz elektricheskikh tsepey. sPb.: Piter. 640. (in Russian)
- [18]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6. (in Russian)
- [19]. GNU Octave [online] Available at: www.gnu.org/software/octave/index.html
- [20]. Chernykh I.V. (2008). Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink. Moscow, DMK Press., 288. (in Russian)