

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Л.І. Мазуренко<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, К.М. Василів<sup>2</sup>, докт.техн.наук, О.В. Джура<sup>1\*\*</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua)

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка",  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.

*Розроблено математичну модель асинхронних двигунів власних потреб теплових електричних станцій у фазних координатах, орієнтовану на явні методи числового інтегрування системи диференціальних рівнянь, та створено на її базі програму як засіб дослідження режимів роботи цих двигунів. Проведено дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів та встановлено основні закономірності їхнього перебігу в режимах пуску, зупинки, самозапуску асинхронних двигунів та регулювання продуктивності роботи агрегатів власних потреб зміною частоти обертання асинхронних двигунів шляхом перемикання їхньої кількості пар полюсів. Бібл. 8, рис. 5.*

**Ключові слова:** математична модель, числові методи, асинхронний двигун, тепла електрична станція, власні потреби електричних станцій, режими роботи асинхронних двигунів.

**Вступ.** Надійність та ефективність роботи енергоблоків теплових електричних станцій (ТЕС) визначаються безвідмовною роботою турбогенераторів, які безпосередньо генерують електроенергію, та інших агрегатів: парової турбіни, котлоагрегатів тощо. Виходячи з високого рівня механізованості та автоматизованості технологічного процесу ТЕС, функціонування цих основних агрегатів енергоблоків ТЕС забезпечує велика кількість інших механізмів, які становлять систему допоміжних агрегатів. Серед них механізми транспортування, розмелювання та подачі палива (якщо ТЕС працює на вугіллі), низка різноманітних pomp (живильні, конденсаційні, циркуляційні), а також дуттєві пристрої, димотяги тощо. Такі допоміжні агрегати називаються агрегатами власних потреб (ВП). На сучасних енергоблоках ТЕС майже всі механізми власних потреб приводяться в рух асинхронними двигунами (АД) з короткозамкненими роторами.

Отже, для ефективної експлуатації ТЕС питання аналізу режимів роботи електричних двигунів ВП є принципово важливим. Необхідно проводити аналіз режимів пуску та вибігу двигунів, збільшення та зменшення частоти їхнього обертання для регулювання продуктивності механізмів, які приводять в рух ці двигуни, а також самозапуску та переходу на резервне і аварійне живлення.

Аналізу режимів роботи двигунів механізмів ВП ТЕС присвячено ряд наукових праць [1, 2]. Вони переважно ґрунтуються на класичній теорії електричних машин та спрямовані на вивчення електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в електричних двигунах ВП теплових електростанцій, шляхом проведення спрощених розрахунків їхніх пускових режимів, режимів вибігу та самозапуску. Для визначення пошкоджень в АД аналізують спектр гармонік їхніх фазних струмів [3]. Такий підхід до аналізу режимів роботи двигунів ВП має обмежені можливості отримання повноцінної інформації про характер протікання процесів. Більш достовірну інформацію можна отримати на підставі розв'язку системи їхніх диференціальних рівнянь.

У реальних умовах роботи окремих енергоблоків ТЕС однотипні агрегати власних потреб (АВП) приводяться в рух двома короткозамкненими асинхронними двигунами (наприклад, димотяги та дуттєві агрегати). Для досягнення рівня адекватності математичного моделювання системи двигунів таких агрегатів необхідно моделювати процеси разом з трансформатором власних потреб (ТВП), джерелом його живлення та відповідними агрегатами. Це дозволить при необхідності, аналогічно [4], дослідити також вплив АД на напругу мережі. У разі використання для моделювання диференціальних рівнянь у класичній формі [5, 6] математична модель виявляється складною, що пов'язано з об'єднанням рівнянь моделей окремих структурних елементів. Спростити її можна, використовуючи єдину систему диференціальних рівнянь, що записана у базисі потенціалів незалежних вузлів.

**Метою статті** є розробка математичної моделі, аналіз режимів роботи системи двох асинхронних двигунів власних потреб, в якій кожен з них живиться від окремої вторинної обмотки трансформатора власних потреб.

**Основний матеріал.** За об'єкт дослідження прийнято систему асинхронних двигунів, схема електричного кола якої зображена на рис. 1, де М – трифазна електрична мережа, якою представлено турбогенератор; Т – ТВП; В1, В2 – вимикачі, через які підключаються обмотки статорів АД до вторинних обмоток ТВП; D1, D2 – асинхронні двигуни агрегатів власних потреб;  $\varphi$  та  $i$  – відповідно потенціали незалежних вузлів схеми та

© Мазуренко Л.І., Василів К.М., Джура О.В., 2018

ORCID: <http://www.orcid.org/0000-0002-7059-249X>; \*\* <http://www.orcid.org/0000-0002-0224-3351>

струми фазних гілок структурних елементів;  $E$  – електрорушійна сила мережі. Нижні числові індекси позначають номери потенціалів незалежних вузлів, номери внутрішніх та зовнішніх гілок структурних елементів.  $M, T$  у нижніх індексах показують належність струмів до зовнішніх гілок мережі та трансформатора,  $M_E$  і  $T_P$  – до внутрішніх струмів мережі та трансформатора,  $S, R$  – струмів до статорів і роторів асинхронних двигунів,  $D$  – до струмів їхніх зовнішніх гілок.

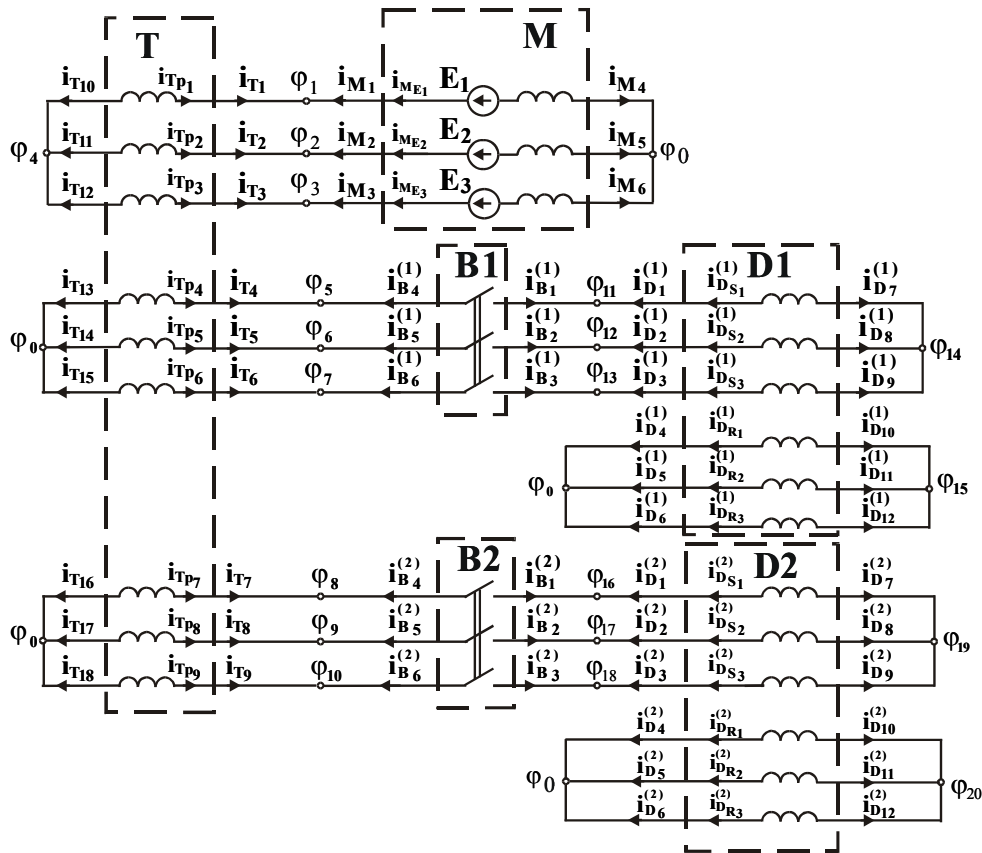


Рис. 1

Математичну модель такої системи двигунів розроблено на базі теорії математичного моделювання електромашино-вентильних систем [4, 8]. Тобто математичною моделлю комплексу асинхронних двигунів власних потреб ТЕС є система диференціальних рівнянь електричного стану для схеми рис. 1 та диференціальних рівнянь механічного стану – для асинхронних двигунів і їхніх агрегатів. Перша система описує електро-магнітні процеси всієї схеми рис. 1, а друга – електромеханічні процеси, які відбуваються в АД сумісно з АВП. Система рівнянь електричного стану записана у фазних координатах і орієнтована на явні методи числового інтегрування. Кожен із структурних елементів (мережа, трансформатор, асинхронні двигуни та вимикачі) представлено багатополосником у формі рівнянь зовнішніх гілок, записаних за другим законом Кірхгофа, які для кожного структурного елемента схеми рис. 1 мають такий вигляд:

$$p i_j + \Gamma_j \cdot \varphi_j + C_j = 0, \quad (1)$$

де  $p = d/dt$  – оператор диференціювання за часом  $t$ ;  $i_j$  – вектор струмів зовнішніх гілок  $j$ -го елемента;  $\Gamma_j$  – матриця коефіцієнтів, елементами якої є матриці індуктивностей  $j$ -го елемента;  $\varphi_j$  – вектор потенціалів зовнішніх вузлів  $j$ -го елемента;  $C_j$  – вектор вільних членів  $j$ -го структурного елемента схеми.

Диференціальні рівняння механічної рівноваги асинхронних двигунів записуються так

$$(J_D + J_H) \cdot p \omega_D - (M_D - M_H) = 0, \quad (2)$$

де  $J_D, J_H$  – момент інерції ротора двигуна та обертових частин агрегату, відповідно;  $p \omega_D$  – похідна механічної кутової частоти обертання ротора двигуна за часом  $t$ ;  $M_D$  – електромагнітний момент двигуна;  $M_H$  – механічний момент агрегату, який є функцією механічної частоти обертання ротора двигуна  $M_H = M_H(\omega_D)$ .

Загальна система рівнянь електричного стану, записана в базисі потенціалів незалежних вузлів [4], для цієї схеми

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (3)$$

де  $A = \Pi_M \cdot \Gamma_M \cdot \Pi_M^t + \Pi_T \cdot \Gamma_T \cdot \Pi_T^t + \Pi_{D1} \cdot \Gamma_{D1} \cdot \Pi_{D1}^t + \Pi_{D2} \cdot \Gamma_{D2} \cdot \Pi_{D2}^t + \Pi_{B1} \cdot \Gamma_{B1} \cdot \Pi_{B1}^t + \Pi_{B2} \cdot \Gamma_{B2} \cdot \Pi_{B2}^t$  – матриця коефіцієнтів, в якій  $\Pi$  – матриці з'єднання структурних елементів (інцидентії), а  $\Pi^t$  – матриці, транспоновані стосовно  $\Pi$ ;

$V = \Pi_M \cdot C_M + \Pi_T \cdot C_T + \Pi_{D1} \cdot C_{D1} + \Pi_{D2} \cdot C_{D2} + \Pi_{B1} \cdot C_{B1} + \Pi_{B2} \cdot C_{B2}$  – вектор вільних членів;  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{20})$  – вектор потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1.

*Алгоритм розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів.* Вхідними даними слугують каталожні параметри ТВП, асинхронних двигунів та електричної мережі, а також початкові умови, які систематизовані у вектор інтегрованих змінних, що має таку структуру:

$$V = (V_M, V_T, V_B^{(1)}, V_B^{(2)}, V_D^{(1)}, V_D^{(2)}, t) = (i_{Me1}, i_{Me2}, i_{Me3}, i_{Tp1}, \dots, i_{Tp9}, i_{B1}^{(1)}, i_{B2}^{(1)}, i_{B3}^{(1)}, i_{B1}^{(2)}, i_{B2}^{(2)}, i_{B3}^{(2)}, i_{DS1}^{(1)}, i_{DS2}^{(1)}, i_{DS3}^{(1)}, i_{DR1}^{(1)}, i_{DR2}^{(1)}, i_{DR3}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, i_{DS1}^{(2)}, i_{DS2}^{(2)}, i_{DS3}^{(2)}, i_{DR1}^{(2)}, i_{DR2}^{(2)}, i_{DR3}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}, t), \quad (4)$$

де  $\gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}$  – електричний кут повороту та механічна частота обертання роторів асинхронних двигунів.

Алгоритмом розрахунку процесів є послідовність дій:

- на базі відомих початкових умов (вектора  $V$ ) рівняння (4) і каталожних даних мережі, трансформатора, асинхронних машин формують матриці коефіцієнтів  $\Gamma_M, \Gamma_T, \Gamma_{D1}, \Gamma_{D2}, \Gamma_{B1}, \Gamma_{B2}$  та вектори вільних членів  $C_M, C_T, C_{D1}, C_{D2}, C_{B1}, C_{B2}$  з рівняння (1);
- формують та розв'язують стосовно вектора потенціалів  $\varphi$  систему рівнянь електричного стану (3);
- за відомих вектором потенціалів  $\varphi$  з рівнянь (1) та (2) визначають вектори інтегрування структурних елементів схеми рис. 1, з яких формують вектор інтегрування  $pV$  всієї системи двигунів, що дорівнює похідній вектора інтегрованих змінних  $V$  (4) за часом  $t$  ( $pV = dV/dt$ );
- на підставі вектора інтегрування  $pV$  та заданого кроку інтегрування  $\Delta t$  одним з явних методів чисельного інтегрування визначають нове значення вектора  $V$ , який слугує результатом інтегрування диференціальних рівнянь;
- описана процедура продовжується до виходу поточного часу інтегрування  $t$  за межі заданого кінцевого.

На підставі математичної моделі розроблено комп'ютерну програму, яка дає змогу розраховувати електромагнітні і електромеханічні процеси системи асинхронних двигунів (рис. 1). З метою тестування марематичної моделі виконано дослідження режиму роботи системи двох АД димотягів типу ДАЗО–1914–10.12А потужністю  $P=1500/850$  кВт, напругою  $U=6000$  В, частотою обертання  $n=597/497$  об/хв енергоблоку №1 Бурштинської ТЕС. У вибраному режимі роботи АД передбачено такі його фази. На початку в момент часу  $t_1=0$  с запускаються обидва двигуни. В моменти часу  $t_2=45$  с,  $t_3=48$  с та  $t_4=50$  с відповідно перший АД відключається, для регулювання продуктивності димотягів перемикається з кількості пар полюсів  $P_0=6$  на  $P_0=5$  та вмикається. В моменти часу  $t_5=145$  с,  $t_6=148$  с та  $t_7=150$  с перший АД відключається, перемикається з кількості пар полюсів  $P_0=5$  на  $P_0=6$  та вмикається, а в момент часу  $t_8=195$  с перший АД відключається остаточно. Другий АД працює в такому режимі: в моменти часу  $t_9=50$  с,  $t_{10}=158$  с та  $t_{11}=190$  с відключається, вмикається повторно та відключається остаточно. Характерним для цього режиму роботи АД є втрата електроживлення в момент часу  $t_{12}=170$  с, а відновлення подачі електроживлення виконано у момент часу  $t_{13}=170,2$  с, після чого відбувається самозапуск АД.

Наглядну інформацію про режим роботи АД надають розрахункові залежності координат від часу, до яких належать частоти обертання, електромагнітні моменти та моменти механічного опору АД, а також фазні струми статора першого асинхронного двигуна впродовж цілого проміжку його роботи, а в окремому форматі – на проміжку часу втрати та відновлення електроживлення разом із проміжком часу самозапуску.

На рис. 2 показано розрахункові залежності від часу частот обертання асинхронних двигунів  $\omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}$ .

Цей рисунок виразно ілюструє роботу обидвох АД у всіх фазах режиму – вмикання, відключення та перехід на іншу кількість пар полюсів, а також самозапуск. На рис. 3 зображено розрахункові залежності від часу електромагнітного моменту першого асинхронного двигуна  $M_D^{(1)}$  та механічного моменту опору димотяга першого двигуна  $M_H^{(1)}$ . Криві на рис. 2 та рис. 3 відображають динаміку електромеханічного процесу.

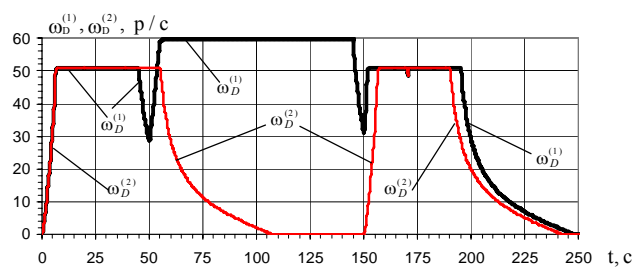


Рис. 2

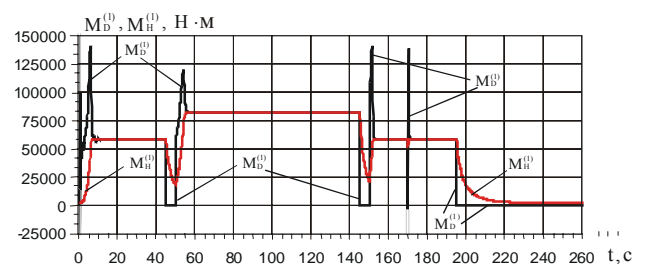


Рис. 3

На рис. 4 та рис. 5 відповідно показано розрахункові залежності від часу миттєвих значень фазних струмів статора першого АД на цілому проміжку роботи та на проміжку часу в околі втрати електроживлення і

самозапуску відповідно. Характер кривих струмів на рис. 4 виразно відображає вмикання та відключення першого АД разом із пусковими перехідними процесами і їхньою тривалістю включно, а також ідентифікує перехідний процес, спричинений втратою та відновленням електроживлення. Рис. 5 дає змогу побачити характер фазних струмів в околі моменту часу втрати та відновлення електроживлення разом із процесом самозапуску АД.

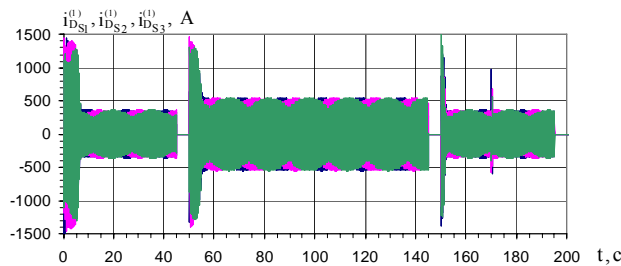


Рис. 4

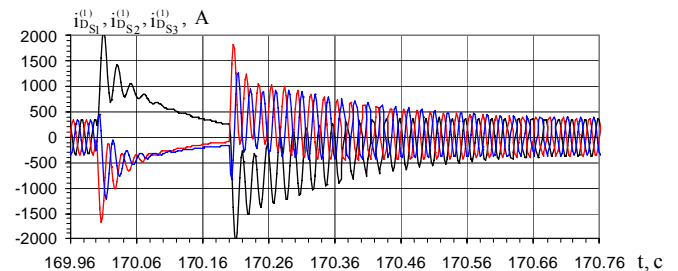


Рис. 5

Аналіз кривих механічних частот обертання першого та другого АД, електромагнітного моменту та механічного моменту опору першого асинхронного двигуна, а також його струмів, зображених на рис. 2–5, показує, що характер усіх цих координат відображає їхній взаємний вплив, що, у свою чергу, вказує на відповідність форми цих кривих фізиці електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в системі двигунів. Такий результат є і бажаним, і очікуваним, бо електромагнітні та електромеханічні процеси системи АД разом із мережею і ТВП описані єдиною системою диференціальних рівнянь, що дає змогу враховувати взаємний вплив усіх структурних елементів.

#### Висновки.

1. Розроблено математичну модель системи асинхронних двигунів власних потреб ТЕС на основі диференціальних рівнянь у базисі потенціалів незалежних вузлів, яка враховує найважливіші чинники, що впливають на перебіг електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цій системі: взаємні електромагнітні зв'язки електричних контурів АД та їхню нелінійність, взаємний вплив роботи двигунів один на одного та на ТВП, втрату та відновлення напруги живлення (самозапуск двигунів), а також взаємний вплив двигунів і механізмів агрегатів власних потреб ТЕС, які приводяться в рух двигунами.

2. Математична модель дає змогу моделювати електромагнітні і електромеханічні процеси у симетричних і несиметричних, усталених і динамічних режимах роботи включно з самозапуском та зміною частоти обертання АД шляхом перемикання кількості їх пар полюсів для системи асинхронних двигунів розглянутої в роботі конфігурації довільної потужності та широкого спектру призначення агрегатів власних потреб ТЕС.

3. Досліджено електромагнітні і електромеханічні процеси під час пуску, самозапуску після втрати і відновлення електроживлення, при зміні частоти обертання шляхом перемикання кількості пар полюсів та вибігу АД димотягів. Розрахункові дослідження режимів двигунів ВП (димотягів, дуттєвих агрегатів тощо) дають змогу визначити їхні оптимальні режими з метою раціонального планування оперативних перемикань для забезпечення необхідної продуктивності роботи агрегатів.

1. Аббасов Э.М., Голоднов Ю.М., Зильберман В.А., Мурзаков А.Г. Собственные нужды тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1991. 272 с.

2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

3. Matić D., Kanović Z., Reljić D., Kulić F., Oros D. and Vasić V. Broken bar detection using current analysis. A case study. 2013 9th IEEE International Symposium on *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. Valencia, 2013. Pp. 407–411. DOI: <https://doi.org/10.1109/DEMPEP.2013.6645748>

4. Zheng F., Sun S., Zhou L., Liu W., Wang J. and Han L. Study on Large Asynchronous Motor Starting Check for Auxiliary Power System. 2010 Asia-Pacific *Power and Energy Engineering Conference*. Chengdu. 2010. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448843>.

5. Алмуратова Н.К. Энергосберегающий электропривод центробежных насосов: дис. ... докт. философии (PhD). Алматы. 2017. 150 с.

6. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2006. 607 с.

7. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. Львів: Вища школа. 1986. 164 с.

8. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. К.: Наукова думка, 1979. 208 с.

.УДК 621.313

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Л.И. Мазуренко<sup>1</sup>, докт.техн.наук, К.Н. Васылив<sup>2</sup>, докт техн.наук, А.В. Джура<sup>1</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua)

<sup>2</sup>Национальный университет "Львівська політехніка",

ул. С. Бадеры, 12, Львов, 79013, Украина.

*Разработана математическая модель асинхронных двигателей собственных нужд тепловых электрических станций в фазных координатах, ориентированная на явные методы численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, создана на ее базе программа как средство исследования режимов работы этих двигателей. Произведено исследование электромагнитных и электромеханических процессов и установлены основные закономерности их протекания в режимах пуска, останова, самозапуска асинхронных двигателей и регулирования производительности работы агрегатов собственных нужд изменением частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения их количества пар полюсов. Библиограф. 8, рис. 5.*

**Ключевые слова:** математическая модель, численные методы, асинхронный двигатель, тепловая электрическая станция, собственные нужды электрических станций, режимы работы асинхронных двигателей

## MATHEMATICAL MODEL AND WORKING REGIMES OF INDUCTION MOTORS OPERATING WITHIN THERMAL POWER STATIONS

L.I. Mazurenko<sup>1</sup>, K.M. Vasyliv<sup>2</sup>, O.V. Dzhura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv 03057, Ukraine.

e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua)

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National university,

S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine.

*A mathematical model of the modes of operation of the asynchronous motor complex for the own requirements of thermal electric power stations in the currents of the phase is developed in the article as well an accent is focused on explicit methods of numerical integration of the differential equations system. A program code was created on its basis as a tool of studying the operating modes of such engines. The investigation of electromagnetic and electromechanical processes is carried out. The basic patterns of their transmission in the modes of start-up, stopping, self-launch of asynchronous motors and the regulation of the productivity of the units of their own needs by changing the frequency of rotation of asynchronous motors by changing their number of pairs poles [3, table. 5] are described in the paper.*

References 8, figures 5.

**Key words:** mathematical model, numerical methods, asynchronous motor, thermal power station, individual requirements of electric stations, operating modes of asynchronous motors

1. Abbasov E.M., Golodnov Yu.M., Zilberman V.A, Murzakov A.G. Own needs of thermal power plants. Moskva: Energoatomizdat, 1991. 272 p. (Rus).

2. Syromyatnikov I.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors. Moskva: Energoatomizdat, 1984. 240 p. (Rus).

3. Matić D., Kanović Z., Reljić D., Kulić F., Oros D. and Vasić V. Broken bar detection using current analysis – A case study. 2013 9th IEEE International Symposium on *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. Valencia, 2013. Pp. 407–411. DOI: <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2013.6645748>

4. Zheng F., Sun S., Zhou L., Liu W., Wang J. and Han L. Study on Large Asynchronous Motor Starting Check for Auxiliary Power System. 2010 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Chengdu. 2010. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448843>

5. Almuratova N.K. Energy-saving electric drive of centrifugal pumps: dis. ... Doct. philosophy (PhD). Almaty. 2017. 150 p. (Rus).

6. Kopylov I.P. Electric machines: a textbook for students of electromechanics and electricity specialties of universities. Moscow: Vysshaya Shkola. 2006. 607 p. (Rus).

7. Plachtina E.G. Mathematical modeling of electromechanical-ventyl systems. Lviv: Vyshcha shkola. 1986. 164 p. (Rus).

8. Philts R.V. Mathematical Foundations of the Theory of Electromechanical Transformers. Kiev: Naukova dumka, 1979. 208 p. (Rus).

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 11.04.2018