

К.М. Василів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДИМОТЯГІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Розроблено математичну модель електротехнічного комплексу: «Електрична мережа – трансформатор – два асинхронні двигуни» у фазних координатах, орієнтовану на явні методи числового інтегрування системи диференціальних рівнянь. На базі математичної моделі створено програмний комплекс і проведено дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів та встановлено основні закономірності їх перебігу в режимах пуску, зупинки та самозапуску асинхронних двигунів димотягів енергоблоку теплової електричної станції. Бібл. 9, рис. 12.

Ключові слова: математична модель, чисельні методи, тепла електростанція, асинхронні двигуни.

Разработана математическая модель электротехнического комплекса: «Электрическая сеть – трансформатор – два асинхронных двигателя» в фазных координатах, ориентированная на явные методы численного интегрирования системы дифференциальных уравнений. На базе математической модели создан программный комплекс и произведено исследование электромагнитных и электромеханических процессов и установлено основные закономерности их протекания в режимах пуска, останова и самозапуска асинхронных двигателей дымососов энергоблока тепловой электрической станции. Библ. 9, рис. 12.

Ключевые слова: математическая модель, численные методы, тепловая электростанция, асинхронные двигатели.

Постановка проблеми. Потужні теплові електричні станції (ТЕС) слугують однією з базових структур сучасної енергосистеми України. Не менше половини електроенергії, яка генерується в Україні припадає саме на ТЕС. Варто зазначити, що теплові електричні станції виробляють вагомий відсоток електроенергії і в інших передових промислово розвинених країнах і Європи, і світу.

Від надійності і ефективності роботи ТЕС, загалом, і їх енергоблоків, зокрема, принципово залежить стабільність та надійність функціонування енергосистеми і, як наслідок, продуктивність роботи великої кількості споживачів електроенергії, серед яких потужні промислові підприємства, транспортні системи та інші споживачі.

Надійність роботи енергоблоків ТЕС значною мірою визначається належним функціонуванням турбогенераторів, які безпосередньо генерують електроенергію, а тому вважаються найголовнішими агрегатами енергоблоків ТЕС. Роботу турбогенераторів, своєю чергою, забезпечують такі важливі агрегати як парові турбіни та котлоагрегати, які відносять до групи основних.

Енергоблоки сучасних ТЕС високомеханізовані та автоматизовані. Це означає, що функціонування всіх основних агрегатів енергоблоків ТЕС забезпечує велика кількість інших агрегатів, які відносяться до допоміжних. Серед них механізми транспортування, розмелювання та подачі палива (якщо ТЕС працює на вугіллі), низка різноманітних pomp (живильні, конденсаційні, циркуляційні), а також дутеві пристрої та димотяги і т. ін. Всі такі допоміжні агрегати називаються агрегатами власних потреб (ВП), які поділяються на відповідальні і невідповідальні. Відмова в роботі відповідальних агрегатів ВП призводить до порушення основного технологічного циклу виробництва електроенергії і навіть до відключення основних агрегатів: турбогенератора, парової турбіни, котлоагрегату, а відмова невідповідальних агрегатів такого критичного впливу не має.

На сучасних енергоблоках ТЕС майже всі механізми власних потреб приводяться в рух короткозамк-

неними асинхронними двигунами (АД), потужності яких сягають декількох МВт. Асинхронні двигуни застосовуються і для приводу димотягів, функціонування яких є критичним для роботи енергоблоку. Адже відмова в роботі одного з двох димотягів призводить до зниження продуктивності енергоблоку на 30-40 %, а відмова двох димотягів – до аварійної зупинки роботи котла і, як наслідок, до відключення енергоблоку.

Агрегати ВП за своїм призначенням слугують своєрідними «руками», якими обслуговувальний персонал забезпечує роботу енергоблоку в заданих режимах роботи (запуску і зупинки енергоблоку, збільшення та зменшення видачі потужності в енергосистемі і т. ін.). Практично підтримуються такі режими роботи енергоблоків керуванням роботою електричних двигунів (ЕД) власних потреб електростанції. Тому, для грамотної і ефективної експлуатації ТЕС питання аналізу режимів роботи електричних двигунів власних потреб є принципово важливим. В цьому контексті критично важливим є коректний аналіз режимів пуску та вибігу електричних двигунів, збільшення та зменшення їх частоти обертання для регулювання продуктивності механізмів, які приводять в рух ці двигуни, а також питання самозапуску та переходу на резервне і аварійне живлення.

Аналіз наукових публікацій та результатів практичних досліджень. Питанню аналізу режимів роботи електричних двигунів механізмів власних потреб електричних станцій приділена доволі велика кількість наукових праць. Переважно ці праці ґрунтуються на класичній теорії електричних машин і спрямовані на вивчення особливостей закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в системах електричних двигунів ВП основних видів електростанцій (теплових та атомних). З погляду практики експлуатації енергоблоків електричних станцій актуальним є аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів електродвигунів власних потреб у всіх без винятку режимах їх роботи: пускових, номі-

© К.М. Василів

нальному режимі, а також вивчення процесів вибігу та самозапуску. Саме ці питання слугують предметом аналізу режимів роботи електродвигунів власних потреб в джерелах [1, 3-5, 7, 9]. Так, у [1] описано загальну структуру, основні механізми, електродвигуни, схеми електропостачання ВП теплових електростанцій. Розглянуто режими роботи електродвигунів власних потреб, схеми керування релейного захисту і автоматики електродвигунів і елементів мереж 6,3 та 0,4 кВ. Розглянуто питання підвищення надійності електричної частини ВП ТЕС та перспективи застосування регульованого електроприводу змінного струму. Дано аналіз характерних пошкоджень у ВП та запропоновані шляхи їх запобігання. У [3] розглянуто загальну характеристику агрегатів власних потреб електричних станцій (ЕС), процеси пуску і вибігу електричних двигунів власних потреб. Описано вплив самозапуску на технологічний режим роботи енергоблоку. Викладені загальні вимоги до схем електропостачання ВП та наведені найпоширеніші з них. Наведено спрощений розрахунок самозапуску електричних двигунів власних потреб. У [4] розглянуто системи власних потреб різних типів електростанцій, наведено характеристики їх механізмів, а також виконано аналіз самозапуску електродвигунів механізмів власних потреб. Розглянуто питання вибору трансформаторів, установок постійного струму та схем власних потреб електроустановок.

Фундаментальний аналіз режимів роботи асинхронних і синхронних двигунів виконано у [7]. Тут наведено основні їх навантажувальні властивості, значну увагу виділено питанням нагріву електродвигунів. Розглянуто питання несиметричних режимів роботи двигунів і компенсаторів. Достатньо повно і ґрунтовно описано процеси пуску і самозапуску електричних двигунів. Досліджено питання умов самозапуску двигунів та наведено результати експериментальних досліджень цих режимів. Розглянуто питання одиночного і групового вибігу електричних двигунів змінного струму. Всі ці питання є актуальними для практики експлуатації електричних двигунів власних потреб ТЕС.

Актуальність досліджень. Наявність наукових праць, в яких виконано аналіз режимів роботи електричних двигунів механізмів власних потреб електричних станцій та наведені достовірні результати досліджень безумовно сприяють підвищенню рівня ефективності їх експлуатації. Проте з матеріалу, викладеного в розглянутих літературних джерелах очевидно, що для його застосування в практиці експлуатації конкретних агрегатів власних потреб електричних станцій необхідні істотні його доопрацювання. Адже викладений в цих джерелах матеріал поданий у загальній концептуальній формі, що робить проблематичним його використання стосовно конкретній ситуації з двигунами різних типів, різного призначення та потужностей, а також особливостей схем електроживлення.

В цьому контексті очевидним є те, що на сьогодні не достатньо уваги виділено питанням розробки технічних засобів аналізу режимів роботи електричних двигунів власних потреб ЕС, які були б придатні для безпосереднього їх застосування в практиці експлуатації. Однозначно, що більш достовірні результати стосовно режимів роботи електричних двигунів

ВП можна отримати на підставі розв'язку системи диференціальних рівнянь, які описують процеси в динамічних режимах роботи (пуску, вибігу, самозапуску і т. ін.) із застосуванням сучасних комп'ютерних систем. Крім цього, аналіз стану справ в питанні експлуатації електричних станцій вказує на те, що, з одного боку, в практичній діяльності обслуговувальний персонал здебільшого користується лише нормативними матеріалами і документами, а тому не завжди вникає в сутність законності перебігу електромеханічних і електромеханічних процесів ЕД конкретних агрегатів в різних їх режимах роботи за конкретних обставин, а, з іншого боку, провести фізичний експеримент на предмет аналізу режимів роботи електричних двигунів ВП в умовах функціонування енергоблоку не лише складно, але й часто не можливо.

Наведене вище дає підстави стверджувати, що розробка засобів аналізу режимів роботи електричних двигунів власних потреб ТЕС, якими слугують математичні моделі і відповідні їм програмні комплекси є актуальною науково-практичною проблемою.

Задачі досліджень. Підвищення надійності та ефективності роботи теплових електричних станцій можливе лише через максимальне використання знань в контексті закономірностей перебігу електромеханічних і електромеханічних процесів, які відбуваються першочергово в турбогенераторах, а також в системах електричних двигунів механізмів власних потреб під час їх роботи в нормальних і аварійних режимах з врахуванням особливостей умов та стану цих двигунів (схем з'єднання та конкретних ситуацій стосовно системи ВП електростанцій у взаємозв'язку її елементів між собою). Результати наукових досліджень, отриманих у літературних джерелах (включно з наведеними тут) дають змогу лише у загальних рисах і переважно якісно оцінювати режими роботи ЕД. Поєднання передових теорій математичного моделювання в області електроенергетики і електромеханіки з можливостями сучасних інформаційних технологій дасть змогу розробити математичні моделі високого рівня адекватності, на підставі яких, своєю чергою, створити відповідний комплекс програм, за допомогою якого можна оперативно виконувати розрахунок необхідних режимів роботи та оперативно приймати рішення стосовно позитивного впливу на роботу двигунів.

Отже, **завданням статті** є розробка математичної моделі системи двох короткозамкнених асинхронних двигунів димотягів енергоблоку теплових електричних станцій, які живляться від трансформатора власних потреб, та відповідного програмного забезпечення, призначеного для оперативного аналізу режимів роботи цих двигунів за допомогою сучасної комп'ютерної техніки.

Виклад основного матеріалу. В реальних умовах роботи окремих енергоблоків ТЕС димотяги одного котлоагрегату приводяться в рух двома короткозамкненими електричними двигунами. Для досягнення рівня адекватності математичного моделювання системи двигунів димотягів достатнього для практичних потреб необхідно моделювати процеси не лише самих двигунів, але й в трансформаторі власних потреб (ТВП) енергоблоку, від якого живляться

двигуни. Це дасть змогу повніше відобразити умови роботи двигунів, а також надасть можливість моделювання процесів, які відбуваються в двигунах під час втрати і відновлення робочого електроживлення ТВП та зв'язаних з цим режимів самозапуску асинхронних двигунів.

Виходячи з таких міркувань, за об'єкт дослідження прийнято електротехнічний комплекс, схема електричного кола якого зображена на рис. 1.

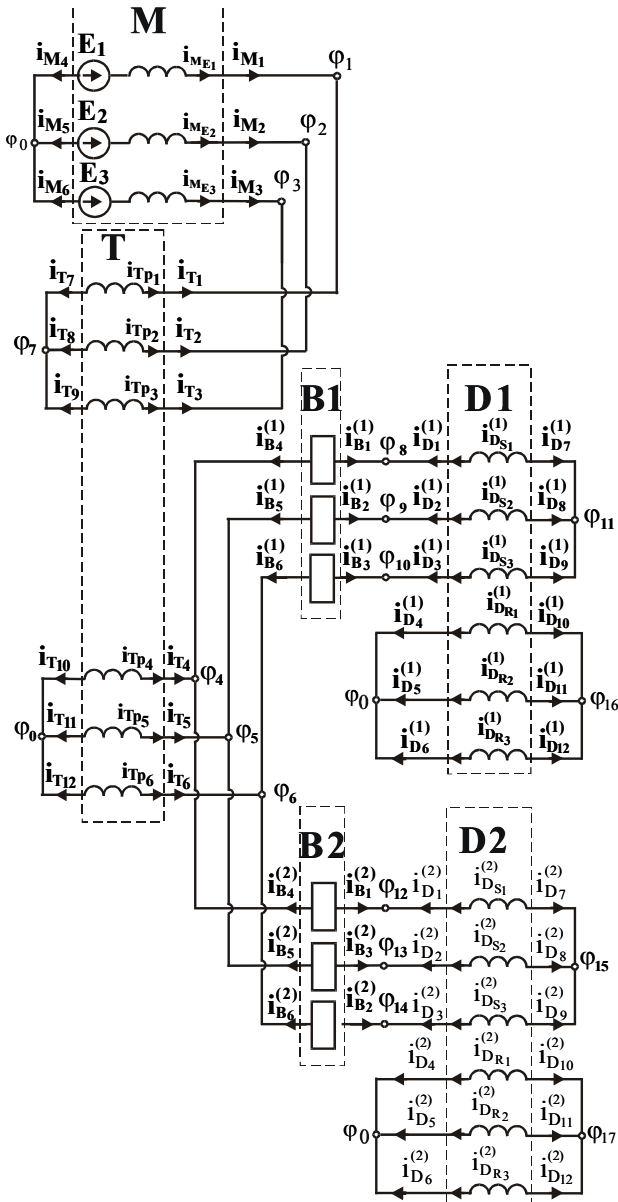


Рис. 1. Схема електричного кола електротехнічного комплексу «Електрична мережа – трансформатор – два асинхронні двигуни»

З цього рисунку видно, що електричні двигуни димотягів живляться від вторинної обмотки трансформатора власних потреб через вимикачі, а первинна обмотка трансформатора живиться від електричної мережі, якою представлено турбогенератор. На рис. 1 літерою М позначено трифазну електричну мережу; літерою Т позначено ТВП; написами В1, В2 – вимикачі, через які підключаються обмотки статорів асинхронних двигунів до вторинної обмотки ТВП, а написами D1, D2 – два асинхронні двигуни димотягів.

Літерою φ позначено потенціали незалежних вузлів схеми, літерою «i» – струми фазних гілок структурних елементів, а літерою E – електрорушійну силу мережі. В нижніх індексах числами позначено номери незалежних вузлів, номери фазних гілок структурних елементів схеми, а також номери зовнішніх гілок структурних елементів. Буквами М, Т у нижніх індексах позначено належність струмів до зовнішніх гілок мережі і трансформатора, а надписами E_E та T_P – належність до внутрішніх струмів мережі та трансформатора. Буквами S, R у нижніх індексах позначено належність струмів до статорів і роторів асинхронних двигунів, а буквою D – до струмів зовнішніх гілок асинхронних двигунів.

Математичну модель електротехнічного комплексу (ЕТК) «Трифазна електрична мережа – трансформатор – два асинхронні двигуни» (ЕМ – Т – АД) розробимо на базі теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем [6] та низки інших напрацювань, викладених у [2, 8]. Отже, математичною моделлю ЕТК «ЕМ – Т – АД» є система диференціальних рівнянь електричного стану для схеми рис. 1 та диференціальних рівнянь механічного стану для асинхронних двигунів і димотягів. Перша система рівнянь описує електромагнітні процеси всієї схеми рис. 1, а друга – електромеханічні процеси, які відбуваються в асинхронних двигунах. Система рівнянь електричного стану записана у фазних координатах і орієнтована на явні методи числового інтегрування.

Кожен із структурних елементів (електрична мережа, трансформатор, вимикачі та асинхронні двигуни) представлені багатополюсниками у вигляді рівнянь, записаних за другим законом Кірхгофа. Розглянемо математичні моделі структурних елементів.

Математичну модель першого асинхронного двигуна розроблено згідно з [2, 6, 8]. Електромагнітні та електромеханічні процеси опишемо системою диференціальних рівнянь електричної рівноваги та диференціальним рівнянням механічної рівноваги відповідно. Першу групу рівнянь формуємо на базі законів Кірхгофа, а механічну рівновагу опишемо рівнянням Даламбера.

Отже, електричний стан першого асинхронного двигуна опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке має такий вигляд [6]:

$$p i_D^{(1)} + \Gamma_D^{(1)} \cdot \varphi_D^{(1)} + C_D^{(1)} = 0, \quad (1)$$

де $p = d/dt$ – оператор диференціювання за часом t ;

$$i_D^{(1)} = (i_{D1}^{(1)}, i_{D2}^{(1)}, i_{D3}^{(1)}, i_{D4}^{(1)}, i_{D5}^{(1)}, i_{D6}^{(1)}, i_{D7}^{(1)}, i_{D8}^{(1)}, i_{D9}^{(1)}, i_{D10}^{(1)}, i_{D11}^{(1)}, i_{D12}^{(1)})$$

– вектор струмів зовнішніх гілок;

$$\varphi_D^{(1)} = (\varphi_{D1}^{(1)}, \varphi_{D2}^{(1)}, \varphi_{D3}^{(1)}, \varphi_{D4}^{(1)}, \varphi_{D5}^{(1)}, \varphi_{D6}^{(1)}, \varphi_{D7}^{(1)}, \varphi_{D8}^{(1)}, \varphi_{D9}^{(1)}, \varphi_{D10}^{(1)}, \varphi_{D11}^{(1)}, \varphi_{D12}^{(1)})$$

– вектор потенціалів зовнішніх вузлів;

$$\Gamma_D^{(1)} = \begin{bmatrix} (L_D^{(1)})^{-1} & -(L_D^{(1)})^{-1} \\ -(L_D^{(1)})^{-1} & (L_D^{(1)})^{-1} \end{bmatrix}; C_D^{(1)} = \begin{bmatrix} (L_D^{(1)})^{-1} \\ -(L_D^{(1)})^{-1} \end{bmatrix} \times E_D^{(1)} \quad (2)$$

– матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів.

Компоненти матриці коефіцієнтів (2) мають таку структуру

$$L_D^{(1)} = \begin{bmatrix} L_{S,S}^{(1)} & L_{S,R}^{(1)} \\ L_{R,S}^{(1)} & L_{R,R}^{(1)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $L_{S,S}^{(0)}$ – матриця власних індуктивностей контурів статора; $L_{S,R}^{(0)}, L_{R,S}^{(0)}$ – матриці взаємних індуктивностей між контурами статора і ротора та між контурами ротора і статора відповідно; $L_{R,R}^{(0)}$ – матриця власних індуктивностей контурів ротора.

Компоненти вектора вільних членів з (2) мають таку структуру $E_D^{(1)} = L_{D,S,R}^{(1)} \cdot i_{D,R}^{(1)} + R_{D,S}^{(1)} \cdot i_{D,S}^{(1)}$, де $L_{D,S,R}^{(1)}$ – похідна матриці $L_{D,S,R}^{(0)}$ за кутом повороту ротора двигуна $\gamma_D^{(1)}$; $R_{D,S}^{(1)} = \text{diag}(R_{D,S_1}^{(1)}, R_{D,S_2}^{(1)}, R_{D,S_3}^{(1)})$ – діагональна матриця фазних активних опорів статора; $i_{D,S}^{(1)} = (i_{D,S_1}^{(1)}, i_{D,S_2}^{(1)}, i_{D,S_3}^{(1)}) = (i_{D_1}^{(1)}, i_{D_2}^{(1)}, i_{D_3}^{(1)})$; $i_{D,R}^{(1)} = (i_{D,R_1}^{(1)}, i_{D,R_2}^{(1)}, i_{D,R_3}^{(1)}) = (i_{D_4}^{(1)}, i_{D_5}^{(1)}, i_{D_6}^{(1)})$ – вектори фазних струмів статора і ротора відповідно.

Механічні процеси, які відбуваються в асинхронному двигуні, опишемо диференціальним рівнянням механічної рівноваги. Для першого асинхронного двигуна це рівняння має такий вигляд:

$$(J_D^{(1)} + J_H^{(1)}) \cdot p\omega_D^{(1)} - (M_D^{(1)} - M_H^{(1)}) = 0, \quad (4)$$

де $J_D^{(1)}, J_H^{(1)}$ – момент інерції ротора двигуна та обертових частин його механічного навантаження відповідно; $p\omega_D^{(1)}$ – похідна механічної кутової швидкості обертання ротора двигуна за часом; $M_D^{(1)}$ – електромагнітний момент двигуна; $M_H^{(1)}$ – момент механічного навантаження на валу двигуна.

Момент механічного навантаження визначається за формулою:

$$M_H^{(1)} = M_{H_0}^{(1)} + K_{H_1}^{(1)} \cdot (\omega_H^{(1)})^{K_{H_2}^{(1)}}, \quad (5)$$

де $M_{H_0}^{(1)}$ – статичний механічний момент навантаження; $K_{H_1}^{(1)}$ – коефіцієнт пропорційності; $K_{H_2}^{(1)}$ – показник степеня кутової частоти обертання $\omega_H^{(1)}$.

Структура формули (5) дає змогу підбором числових значень окремих її елементів як вхідних даних здійснювати вибір потрібної механічної характеристики навантаження двигуна з поміж низки можливих.

Електричні схеми вимикачів зобразимо окремими системами трифазних гілок рис. 1. В математичних моделях вимикачів кожен з фаз представимо електричною гілкою, яка складається з послідовно з'єднаних активного опору і індуктивності, значення яких для ввімкненого стану вимикача приймаються малими (такими, що відповідають реальному значенням), а для розімкненого – великими, тобто такими, що відповідають розімкненому колу, в якому струму немає. При цьому перехід від розімкненого стану вимикача до увімкненого виконується миттєво (стрибком), а перехід від увімкненого стану до вимкненого – плавним збільшенням опору та індуктивності фазних гілок вимикача протягом певного заданого часу (який відповідає реальному часу комутації) за визначеним законом у функції часу. Тут передбачено лінійний закон збільшення опорів і індуктивностей фазних гілок вимикачів. Такий підхід дасть змогу зменшувати струм вимикача від певного значення, яке є на момент початку вимкнення вимикача до нуля.

Отже, електричний стан першого вимикача опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке має такий вигляд:

$$p i_B^{(1)} + \Gamma_B^{(1)} \cdot \Phi_B^{(1)} + C_D^{(1)} = 0, \quad (6)$$

де $i_B^{(1)} = (i_{B_1}^{(1)}, i_{B_2}^{(1)}, i_{B_3}^{(1)}, i_{B_4}^{(1)}, i_{B_5}^{(1)}, i_{B_6}^{(1)})$ – вектор струмів зовнішніх гілок;

$\Phi_B^{(1)} = (\Phi_{B_1}^{(1)}, \Phi_{B_2}^{(1)}, \Phi_{B_3}^{(1)}, \Phi_{B_4}^{(1)}, \Phi_{B_5}^{(1)}, \Phi_{B_6}^{(1)})$ – вектор потенціалів зовнішніх вузлів;

$$\Gamma_B^{(1)} = \begin{bmatrix} (L_B^{(1)})^{-1} & - (L_B^{(1)})^{-1} \\ - (L_B^{(1)})^{-1} & (L_B^{(1)})^{-1} \end{bmatrix}; C_D^{(1)} = \begin{bmatrix} (L_B^{(1)})^{-1} \\ - (L_B^{(1)})^{-1} \end{bmatrix} \times E_B^{(1)} \quad (7)$$

– матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів, в яких $L_B^{(1)} = \text{diag}(L_{B_1}^{(1)}, L_{B_2}^{(1)}, L_{B_3}^{(1)})$ – діагональна матриця індуктивностей, $E_B^{(1)} = \text{colon}(R_{B_1}^{(1)} \cdot i_{B_1}^{(1)}, R_{B_2}^{(1)} \cdot i_{B_2}^{(1)}, R_{B_3}^{(1)} \cdot i_{B_3}^{(1)})$ – вектор-стовпець спаду напруг на опорах фаз вимикача.

Математичну модель трансформатора власних потреб представимо згідно з [6, 8] диференціальним рівнянням зовнішніх гілок, яке має такий вигляд:

$$p i_T + \Gamma_T \cdot \Phi_T + C_T = 0, \quad (8)$$

де $i_T = (i_{T_1}, i_{T_2}, i_{T_3}, i_{T_4}, i_{T_5}, i_{T_6}, i_{T_7}, i_{T_8}, i_{T_9}, i_{T_{10}}, i_{T_{11}}, i_{T_{12}})$ – вектор струмів зовнішніх гілок;

$\Phi_T = (\Phi_{T_1}, \Phi_{T_2}, \Phi_{T_3}, \Phi_{T_4}, \Phi_{T_5}, \Phi_{T_6}, \Phi_{T_7}, \Phi_{T_8}, \Phi_{T_9}, \Phi_{T_{10}}, \Phi_{T_{11}}, \Phi_{T_{12}})$ – вектор потенціалів зовнішніх вузлів;

$$\Gamma_T = \begin{bmatrix} (L_T)^{-1} & - (L_T)^{-1} \\ - (L_T)^{-1} & (L_T)^{-1} \end{bmatrix}; C_T = \begin{bmatrix} (L_T)^{-1} \\ - (L_T)^{-1} \end{bmatrix} \times E_T \quad (9)$$

– матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів, в яких L_T – матриця індуктивностей розміром 6×6 ;

$$E_T = (R_{Tp_1} \cdot i_{Tp_1}, R_{Tp_2} \cdot i_{Tp_2}, R_{Tp_3} \cdot i_{Tp_3}, R_{Tp_4} \cdot i_{Tp_4}, R_{Tp_5} \cdot i_{Tp_5}, R_{Tp_6} \cdot i_{Tp_6})$$

– вектор-стовпець спаду напруг на опорах фазних гілок трансформатора.

Електричну мережу представимо системою трифазних гілок, кожна з яких складається з послідовно з'єднаних активного опору, індуктивності та електрорушійної сили змінного струму. Фази електрорушійних сил зсунуті на 120 градусів. Рівняння зовнішніх гілок трифазної електричної мережі має такий вигляд:

$$p i_M + \Gamma_M \cdot \Phi_M + C_M = 0, \quad (10)$$

де $i_M = (i_{M_1}, i_{M_2}, i_{M_3}, i_{M_4}, i_{M_5}, i_{M_6})$ – вектор струмів зовнішніх гілок; $\Phi_M = (\Phi_{M_1}, \Phi_{M_2}, \Phi_{M_3}, \Phi_{M_4}, \Phi_{M_5}, \Phi_{M_6})$ – вектор потенціалів зовнішніх вузлів;

$$\Gamma_M = \begin{bmatrix} (L_M)^{-1} & - (L_M)^{-1} \\ - (L_M)^{-1} & (L_M)^{-1} \end{bmatrix}; C_M = \begin{bmatrix} (L_M)^{-1} \\ - (L_M)^{-1} \end{bmatrix} \times E_M \quad (11)$$

– матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів, в яких $L_M = \text{diag}(L_{M_1}, L_{M_2}, L_{M_3})$ – діагональна матриця індуктивностей;

$$E_M = (R_{M_1} \cdot i_{M_1} - e_{M_1}, R_{M_2} \cdot i_{M_2} - e_{M_2}, R_{M_3} \cdot i_{M_3} - e_{M_3})$$

– вектор-стовпець вільних членів, а

$e_{M_j} = E_m \sin(\omega \cdot t - (j-1) \cdot \rho)$ ($j = 1, 2, 3$), де E_m – амплітуда електрорушійної сили мережі; $\rho = 2 \cdot \pi / 3$.

Математичні моделі другого асинхронного двигуна і другого вимикача є ідентичними до моделей першого двигуна та першого вимикача відповідно.

Повна система рівнянь електричного стану записується в базисі потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1 і згідно з [6] має такий вигляд:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (12)$$

де A, B – матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів; $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{17})$ – вектор потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1.

Матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів система рівнянь (12) формуються з матриць коефіцієнтів, векторів вільних членів (2), (7), (9), (10) та матриць інцидентії структурних елементів схеми рис. 1 згідно з [6] за формулами:

$$A = \Pi_M \cdot \Gamma_M \cdot \Pi'_M + \Pi_T \cdot \Gamma_T \cdot \Pi'_T + \Pi_B^{(1)} \cdot \Gamma_B^{(1)} \cdot \Pi_B^{(1)} + \Pi_B^{(2)} \cdot \Gamma_B^{(2)} \cdot \Pi_B^{(2)} + \Pi_D^{(1)} \cdot \Gamma_D^{(1)} \cdot \Pi_D^{(1)} + \Pi_D^{(2)} \cdot \Gamma_D^{(2)} \cdot \Pi_D^{(2)}; \quad (13)$$

$$B = \Pi_M \cdot C_M + \Pi_T \cdot C_T +$$

$$+ \Pi_B^{(1)} \cdot C_B^{(1)} + \Pi_B^{(2)} \cdot C_B^{(2)} + \Pi_D^{(1)} \cdot C_D^{(1)} + \Pi_D^{(2)} \cdot C_D^{(2)},$$

де

$$\Gamma_M, \Gamma_T, \Gamma_B^{(1)}, \Gamma_B^{(2)}, \Gamma_D^{(1)}, \Gamma_D^{(2)}; \quad (14)$$

$$C_M, C_T, C_B^{(1)}, C_B^{(2)}, C_D^{(1)}, C_D^{(2)}$$

– матриці коефіцієнтів і вектори вільних членів електричної мережі, трансформатора, вимикачів і асинхронних двигунів;

$$\Pi_M, \Pi_T, \Pi_B^{(1)}, \Pi_B^{(2)}, \Pi_D^{(1)}, \Pi_D^{(2)} \quad (15)$$

– матриці інцидентії електричної мережі, трансформатора, вимикачів та асинхронних двигунів, які описують топологію електричного кола схеми рис. 1; а

$$\Pi'_M, \Pi'_T, \Pi_B^{(1)}, \Pi_B^{(2)}, \Pi_D^{(1)}, \Pi_D^{(2)}$$

– матриці, транспоновані до матриць інцидентії (15).

Алгоритм розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів. Основними вхідними даними слугують каталожні параметри: трансформатора власних потреб, асинхронних двигунів димотягів та електричної мережі, а також початкові умови, які систематизовані у вектор інтегрованих змінних, що має таку структуру:

$$V = (V_M, V_T, V_B^{(1)}, V_B^{(2)}, V_D^{(1)}, V_D^{(2)}, t) = (i_{ME1}, i_{ME2}, i_{ME3}, i_{Tp1}, i_{Tp2}, i_{Tp3}, i_{Tp4}, i_{Tp5}, i_{Tp6}, i_{B1}^{(1)}, i_{B2}^{(1)}, i_{B3}^{(1)}, i_{B1}^{(2)}, i_{B2}^{(2)}, i_{B3}^{(2)}, i_{DS1}^{(1)}, i_{DS2}^{(1)}, i_{DS3}^{(1)}, i_{DR1}^{(1)}, i_{DR2}^{(1)}, i_{DR3}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, i_{DS1}^{(2)}, i_{DS2}^{(2)}, i_{DS3}^{(2)}, i_{DR1}^{(2)}, i_{DR2}^{(2)}, i_{DR3}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}, t). \quad (16)$$

Основними пунктами алгоритму розрахунку процесів є такі дії:

- на підставі початкових умов вектора V (16) і каталожних даних, формуються матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів структурних елементів і через них матриця коефіцієнтів A та вектор вільних членів B системи рівнянь електричного стану (12), яка розв'язується стосовно вектора φ ;

- на зворотному ході на підставі вектора φ , визначають вектор інтегрування pV , який дорівнює похідній вектора інтегрованих змінних V (16) за часом t ($pV=dV/dt$);

- одним з явних методів чисельного інтегрування, на підставі вектора інтегрування pV та кроку інтегрування Δt , визначають нове значення вектора V ;

- описана процедура продовжується до виходу поточного часу інтегрування t за межі кінцевого.

На підставі описаної вище математичної моделі і алгоритму розроблено програмний комплекс мовою програмування FORTRAN, який дає змогу за допомогою комп'ютерів розраховувати електромагнітні і електромеханічні процеси, що відбуваються в електротехнічному комплексі системи димотягів ТЕС.

Нижче наведемо узагальнений аналіз режимів роботи асинхронних двигунів димотягів теплових електростанцій на підставі отриманих результатів математичного моделювання.

В практиці експлуатації режими роботи асинхронних двигунів димотягів визначаються режимом роботи енергоблоку ТЕС. Залежно від обсягу видачі електроенергії в енергосистему необхідно приводити у відповідність потужність котельного агрегату, а значить і роботу димотягів. Це означає, що двигуни повинні забезпечувати збалансовану продуктивність димотягів, яка визначається режимами роботи двигунів включно з їх періодичним відмиканням. Виходячи з цього, практичний інтерес стосовно роботи двигунів димотягів становить режим, у якому передбачено вмикання та відмикання окремих двигунів, що надасть інформацію про пускові режими та режими вибігу. Окрім цього, важливо моделювати режим короткочасної втрати напруги на трансформаторі власних потреб з перемиканням на резервне живлення та подальшим самозапуском двигунів.

Отже, моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів виконаємо для такого режиму роботи асинхронних двигунів димотягів: на початку (у моменті часу $t_1=0$ с) виконується одночасний пуск обидвох АД. У момент часу $t_2=5$ с припиняється подача напруги на трансформатор ВП у продовж проміжку часу $\Delta t=0,2$ с. У момент часу $t_3=7$ с відмикається перший двигун, а в момент часу $t_4=20$ с він знову вмикається. У момент часу $t_5=26$ с вимикається обидва асинхронні двигуни. Такий режим роботи двигунів димотягів дасть змогу охопити всі практично важливі етапи їх роботи включно з груповим вибігом і, водночас, оцінити можливості запропонованої математичної моделі і відповідного програмного комплексу.

Виконаємо розрахунок електромагнітних і електромеханічних процесів двигунів димотягів 11-го енергоблоку Бурштинської ТЕС. Потужність цих двигунів становить 1500 кВт і 850 кВт, а кількість полюсів відповідно дорівнює 8 та 10.

Вхідними даними слугують каталожні дані асинхронних двигунів, трансформатора власних потреб та електричної мережі, а також початкові умови, якими слугує вектор інтегрованих змінних (16). Окрім цього, до вхідних даних належить інформація допоміжного характеру, яка визначає режими роботи програмного комплексу (крок інтегрування, кінцевий час інтегрування і т. ін.).

Результатами моделювання слугують розрахункові залежності від часу миттєвих значень потенціалів незалежних вузлів, фазних струмів трансформатора, фазних струмів статора і ротора, швидкості обертання двигунів, а також електромагнітних моментів двигунів і механічних моментів опору димотягів.

На рис. 2. зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів статора першого двигуна. Форма кривих фазних струмів статора відображає весь робочий цикл двигуна (проміжки часу його роботи та зупинки), а також характер пускових перехідних процесів. На рис. 3. зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів ротора першого двигуна, які в додаток до струмів статора доповнюють інформацію про особливості перебігу електромагнітних процесів першого асинхронного двигуна у якісному і кількісному співвідношенні. Криві струмів ротора важливі тим, що саме в роторі відбувається електромагнітне перетворення енергії.

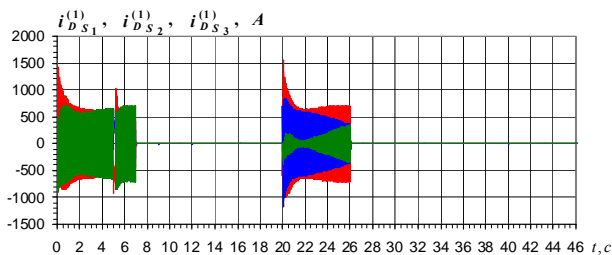


Рис. 2. $i_{D_{S1}}^{(1)}, i_{D_{S2}}^{(1)}, i_{D_{S3}}^{(1)}$ – фазні струми обмотки статора D1

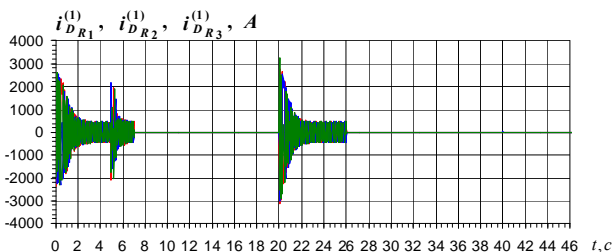


Рис. 3. $i_{D_{R1}}^{(1)}, i_{D_{R2}}^{(1)}, i_{D_{R3}}^{(1)}$ – фазні струми обмотки ротора D1

На рис. 4, 5 відповідно зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів статора та ротора другого двигуна. Криві цих струмів виразно відображають взаємний вплив роботи асинхронних двигунів один на одного. А проявляється цей вплив через зміну величин струмів одного двигуна залежно від стану другого (коли він увімкнений чи вимкнений). З рис. 4, 5 видно, що струми другого двигуна більші коли перший вимкнений.

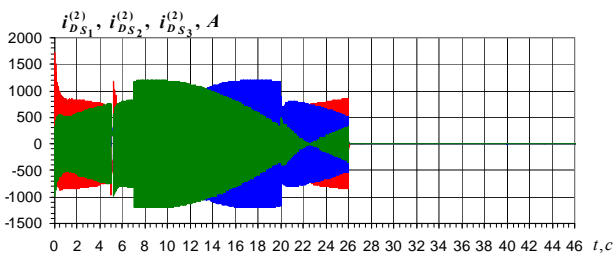


Рис. 4. $i_{D_{S1}}^{(2)}, i_{D_{S2}}^{(2)}, i_{D_{S3}}^{(2)}$ – фазні струми обмотки статора D2

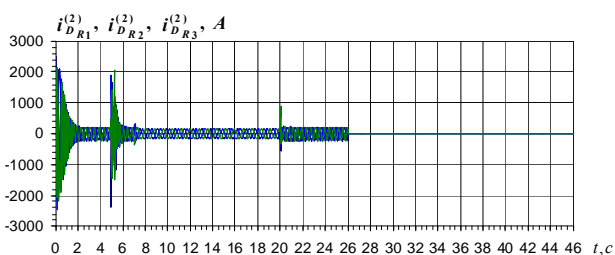


Рис. 5. $i_{D_{R1}}^{(2)}, i_{D_{R2}}^{(2)}, i_{D_{R3}}^{(2)}$ – фазні струми обмотки ротора D2

Наведені на рис. 2-5 залежності струмів характеризують закономірності електромагнітних процесів. Але для оцінки роботопридатності двигунів димотягів необхідно мати достовірну інформацію про закономірності перебігу електромеханічних процесів. Такою інформацією слугують розрахункові залежності електромагнітних моментів двигунів і механічних моментів опору димотягів, які для першого та другого двигунів відповідно зображені на рис. 6, 7.

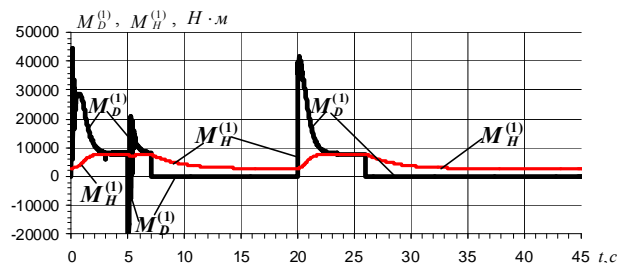


Рис. 6. $M_D^{(1)}, M_H^{(1)}$ – електромагнітний момент першого двигуна та механічний момент опору його димотяга

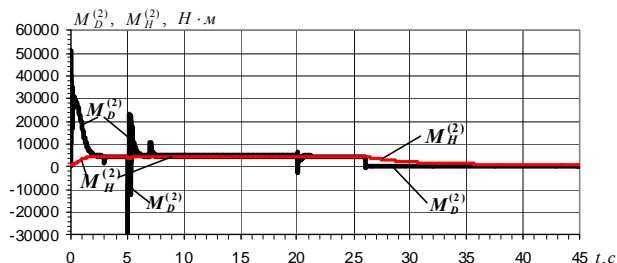


Рис. 7. $M_D^{(2)}, M_H^{(2)}$ – електромагнітний момент другого двигуна та механічний момент опору його димотяга

З цих рисунків видно, що характер кривих електромагнітних моментів відображає закономірності перебігу електромагнітних процесів асинхронних двигунів. На початковій стадії пускового перехідного процесу електромагнітні моменти двигунів мають знакозмінний характер. Це пояснюється великим (близьким до одиниці) значенням ковзання асинхронних двигунів. В міру набирання обертів значення електромагнітних моментів виходять із зони знакозмінності і набувають більш стійкого значення, а в усталеному режимі постійного.

Для отримання коректних результатів стосовно роботи асинхронних двигунів важливо мати не лише функційні залежності електромагнітних моментів двигунів, але й криві моментів механізмів, які приводяться в рух двигунами. Механічні моменти опорів димотягів та дугтевих механізмів змінюються за вентиляторною характеристикою, тобто пропорційно квадрату швидкості обертання. Значення статичного механічного моменту для таких агрегатів є дуже малим відносно механічного моменту в номінальному режимі і дорівнює моменту тертя. Усталеного значення криві механічних моментів вентиляторів димотягів набувають в точці зрівноваження електромагнітних моментів електричних двигунів з механічними моментами опорів вентиляторів, що виразно ілюструють криві на рис. 6, 7.

Продуктивність димотягів визначається частотою їх обертання. Тому з погляду практики експлуатації двигунів димотягів енергоблоків теплових електростанцій важливою є закономірність зміни частоти обертання роторів асинхронних двигунів.

Швидкості обертання роторів асинхронних двигунів визначаються частотою напруги живлення і кількістю пар полюсів. А, з другого боку, на частоту обертання роторів АД має вплив значення механічного моменту навантаження. Тому частота обертання двигунів димотягів визначається результируючою дією цих двох чинників. На рис. 8 зображені розрахункові залежності від часу частоти обертання роторів (у радіанах за секунду) двох асинхронних двигунів $\omega_D^{(1)} = \omega_D^{(1)}(t)$ – першого та $\omega_D^{(2)} = \omega_D^{(2)}(t)$ – другого.

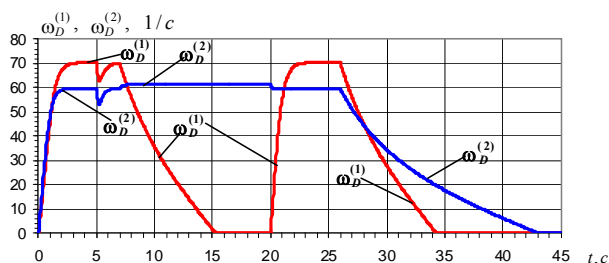


Рис. 8. $\omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}$ – механічна кутова частота обертання роторів асинхронних двигунів

Характер кривих на рис. 8 дає доволі повну і предметну інтегральну картину функціонування агрегатів димотягів загалом, а також під час пускових режимів двигунів та під час режимів їх вибігу, зокрема. Адже, вони відображають продуктивність роботи димотягів не лише в згаданих режимах, але й взаємний вплив їх роботи, а також відображають їх роботу під час втрати живлення ТВП. Взаємний вплив двигунів проявляється в збільшенні частоти обертання другого двигуна на проміжку часу, коли перший двигун вимкнений (проміжок часу від $t = 7$ с до $t = 20$ с, див. рис. 9). Характер кривих на рис. 9 дає змогу визначити час вибігу двигунів, який залежить від моменту інерції махових мас та характеристики механічного навантаження.

Димотяги належать до відповідальних агрегатів власних потреб, тому електричні двигуни димотягів включаються в список цих, які підлягають самозапуску. Виходячи з цього, для практики експлуатації важливо мати достовірну інформацію про закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів під час замозапуску. Як зазначалося вище, в нашому експерименті передбачено виконання самозапуску після перерви живлення, яка дорівнює 0,2 с. В цій ситуації важливо мати функційні залежності від часу частоти обертання та струмів контурів двигунів. Характер кривих частоти обертання двигунів під час самозапуску двигунів ілюструє рис. 8, з якого легко визначити глибину провалу цих координат на проміжку часу втрати напруги, а також час відновлення номінальної частоти обертання двигунів після повторної подачі напруги.

Більш повну інформацію про режим самозапуску можна отримати якщо проаналізувати закономірності електромагнітних процесів на підставі аналізу функційних залежностей миттєвих значень фазних струмів статора і ротора асинхронних двигунів. На рис. 9, 10 зображені розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів статора і ротора першого асинхронного двигуна. З рис. 9 видно, що протягом проміжку часу втрати напруги фазні струми мають аперіодичний характер з тенденцією до зменшення їх значення, а після відновлення напруги характерною є наявність

вільних аперіодичних складових, які є меншими, а ніж під час пуску двигуна зі стану спокою. Натомість струми ротора на проміжку втрати напруги мають синусоїдну форму, а їх амплітуда має тенденцію до зменшення.

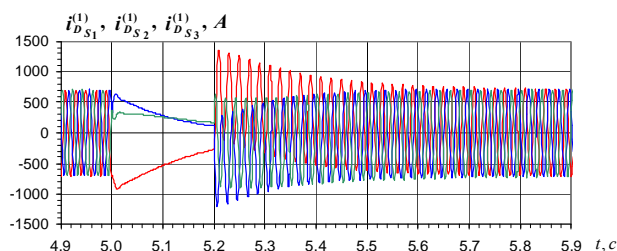


Рис. 9. $i_{D_{S1}}^{(1)}, i_{D_{S2}}^{(1)}, i_{D_{S3}}^{(1)}$ – фазні струми обмотки статора D1

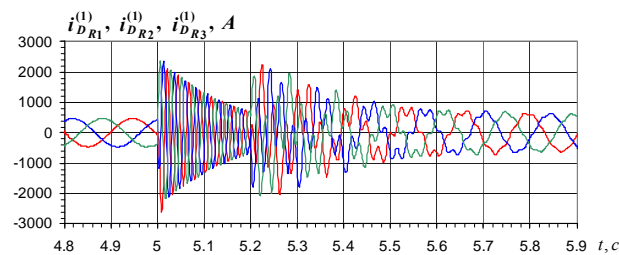


Рис. 10. $i_{D_{R1}}^{(1)}, i_{D_{R2}}^{(1)}, i_{D_{R3}}^{(1)}$ – фазні струми обмотки ротора D1

На рис. 11 та 12 зображені розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів статора і ротора другого асинхронного двигуна.

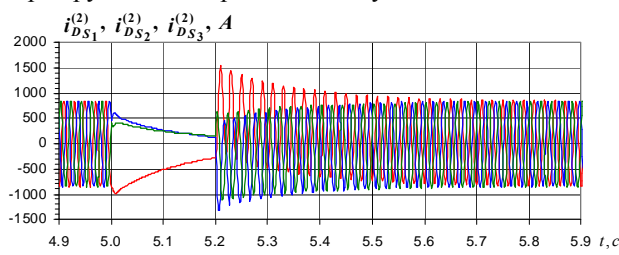


Рис. 11. $i_{D_{S1}}^{(2)}, i_{D_{S2}}^{(2)}, i_{D_{S3}}^{(2)}$ – фазні струми обмотки статора D2

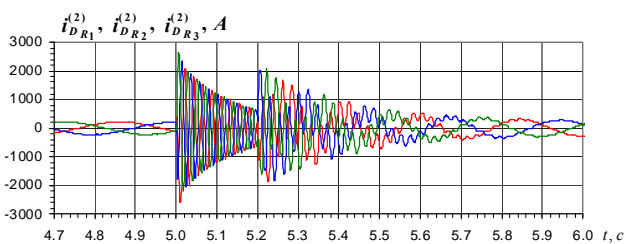


Рис. 12. $i_{D_{R1}}^{(2)}, i_{D_{R2}}^{(2)}, i_{D_{R3}}^{(2)}$ – фазні струми обмотки ротора D2

Подібних результатів експериментів спостерігати не вдалося, а тому, на думку автора, вони становлять предмет наукової новизни. Результати таких математичних експериментів дають змогу оцінити умови самозапуску на предмет можливості його успішного виконання, що становить практичну значимість.

Закономірності зміни фазних струмів другого двигуна подібні до першого, а тому аналізувати їх окремо нема потреби.

Висновки.

1. Аналіз наукових літературних джерел показує, що на сьогодні дослідження режимів роботи двигунів димотягів ТЕС виконується лише в контексті агрегатів власних потреб загалом на базі основних положень класичної теорії електричних машин без засто-

сування системи диференціальних рівнянь для опису динамічних режимів роботи двигунів, що істотно знижує можливості отримання достовірних результатів. Тому, розробка спеціальних засобів дослідження режимів роботи двигунів димотягів ТЕС у вигляді математичних моделей як системи диференціальних рівнянь електричного і механічного стану двигунів димотягів ТЕС та відповідного програмного комплексу є актуальною науково-практичною проблемою.

2. Розроблено математичну модель системи асинхронних двигунів димотягів, яка враховує найважливіші чинники, що впливають на перебіг електромагнітних і електромеханічних процесів: нелінійності електромагнітних зв'язків контурів двигунів, взаємний вплив двигунів і трансформатора власних потреб, вплив втрати та відновлення напруги живлення, а також взаємний вплив двигуна і механізму, який приводиться в рух двигуном.

3. На базі математичної моделі розроблено програмний комплекс, який дає змогу в умовах експлуатації ТЕС виконувати дослідження практично необхідних режимів роботи системи асинхронних двигунів димотягів. Математична модель і програмний комплекс дають змогу моделювати електромагнітні і електромеханічні процеси в симетричних і несиметричних, усталених і динамічних режимах роботи.

4. За допомогою розробленого програмного комплексу виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів асинхронних двигунів димотягів ТЕС в найважливіших режимах роботи. Зокрема, досліджено пускові режими, режим самозапуску після втрати та відновлення напруги, а також отримано якісні і кількісні параметри вибігу двигунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аббасов Э.М., Голоднов Ю.М., Зильберман В.А., Мурзаков А.Г. Собственные нужды тепловых электростанций / Под ред. Ю.М. Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
2. Васильв К.М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Васильв Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с.
3. Курбангалиев У.К. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций. – М.: Энергоиздат, 1982. – 56 с.
4. Лагутин В.М., Тептя В.В., Вишневський С.Я. Власні потреби електричних станцій. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 102 с.
5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
6. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.
7. Сыромиятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
8. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.
9. Электрическая часть станций и подстанций / Под ред. А. А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

REFERENCES

1. Abbasov E.M., Golodnov Yu.M., Zil'berman V.A., Murza-kov A.G. *Sobstvennye nuzhdy teplovykh elektrostantsii* [Own needs of thermal power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 272 p. (Rus).
2. Vasylyv K.M. *Metody i modeli analizu protsesiv avtonomnykh system elektrozhyvlennya na bazi asynkhronizovanoho heneratora*

z bezkontaktnym kaskadnym modul'ovanyim zbudzhuvachem. Diss. dokt. techn. nauk [Methods and models for analyzing the processes of autonomous power supply systems based on an asynchronous generator with a noncontact cascade modulated exciter. Doc. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2010. 398 p. (Ukr).

3. Kurbangaliev U.K. *Samozapusk dvigatelei sobstvennykh nuzhd elektrostantsii* [Self-starting engines for power plants own needs]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 56 p. (Rus).
4. Lahutin V.M., Teptya V.V., Vyshnevs'kyi S.Ya. *Vlasni potreby elektrychnykh stantsiy* [Own needs of power plants]. Vinnytsya, VNTU Publ., 2008. 102 p. (Ukr).
5. Neklepaev B.N. *Elektricheskaya chast' elektrostantsii i podstantsii* [Electric part of power plants and substations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 640 p. (Rus).
6. Plakhtyna E.G. *Matematicheskoe modelirovanie elektromashinno-ventil'nykh sistem* [Mathematical modeling of electro-machine-valve systems]. Lviv, Vishcha shkola Publ., 1986. 164 p. (Rus).
7. Syromiatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (Rus).
8. Fil'ts R.V. *Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei* [Mathematical foundations of the theory of electromechanical transducers]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1979. 208 p. (Rus).
9. Vasil'eva A.A. *Elektricheskaya chast' stantsii i podstantsii* [Electrical part of stations and substations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 576 p. (Rus).

Надійшла (received) 30.05.2017

Васильв Карл Миколайович, д.т.н., проф.,
Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 28а,
тел/phone +38 032 2226403, e-mail: karl.vasylyv@gmail.com

K.M. Vasylyv

Lviv Polytechnic National University,
28a, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes.

Purpose. Development of a model-software complex (MSC) for computer analysis of modes of the system of induction motors (IM) of smoke exhausters of thermal power plant (TPP), the basic elements of which are mathematical models and corresponding software written in the programming language FORTRAN. **Methodology.** Mathematical model serves as a system of differential equations of electrical and mechanical condition. The equation of electric state is written in phase coordinates based on Kirchhoff's laws, and mechanical condition described by the d'Alembert equation. **Mathematical model** focuses on explicit numerical integration methods. **Scientific novelty.** The equation of state of electrical connections takes into account the mutual electromagnetic circuits for transformer of own needs (TON) and induction motors and interdependence (in all possible combinations) between: TON (from which motors powered) and each of the two IM and blood pressure between themselves. The complex allows to simulate electromagnetic and electromechanical processes in transitional and steady, symmetric and asymmetric modes including modes of self-induction motors. **Results.** Complex is used for computer analysis of electromagnetic and electromechanical processes and established the basic laws of motion modes of starting, stopping and self-start of IM of smoke exhausters of the TPP unit. **Practical value.** The complex is suitable for computer analysis of modes of other similar units of own needs of thermal power plants. References 9, figures 12.

Key words: mathematic model, numerical methods, thermal power plant, induction motors.