

К.М. Василів, Л.І. Мазуренко

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПРИВОДУ ГОЛОВНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПОМП ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЕР-1000 АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Створено засоби комп'ютерного дослідження режимів роботи асинхронних двигунів головних циркуляційних pomp ядерного реактора ВВЕР-1000 АЕС. Розроблено математичну модель електротехнічного комплексу: «Синхронний турбогенератор енергоблоку АЕС – електрична мережа енергосистеми – два трансформатори власних потреб – чотири асинхронні двигуни» у фазних координатах, орієнтовану на явні методи чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь. На базі математичної моделі розроблено програмне забезпечення, призначене для дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів системи асинхронних двигунів головних циркуляційних pomp ядерного реактора ВВЕР-1000 в режимах: оперативного перемикання включно з пуском і вибігом, переходу на резервне живлення, самозапуску двигунів з вибігом турбогенератора і без його вибігу. Виконано дослідження процесів системи асинхронних двигунів в режимі оперативного перемикання під час їх живлення від турбогенератора та встановлено основні закономірності їх перебігу в якісному та кількісному співвідношенні. Бібл. 10, рис. 11.

Ключові слова: ядерний реактор, головні циркуляційні помпи, синхронний турбогенератор, трансформатор, асинхронний двигун, пускові режими, самозапуск, математична модель, диференціальні рівняння.

Созданы средства компьютерного исследования режимов работы асинхронных двигателей главных циркуляционных насосов ядерного реактора ВВЭР-1000 АЭС. Разработана математическая модель электротехнического комплекса: «Синхронный турбогенератор энергоблока АЭС – электрическая сеть энергосистемы – два трансформатора собственных нужд – четыре асинхронных двигателя» в фазных координатах, ориентированная на явные методы численного интегрирования системы дифференциальных уравнений. На базе математической модели разработано программное обеспечение, предназначенное для исследования электромагнитных и электромеханических процессов системы асинхронных двигателей главных циркуляционных насосов ядерного реактора ВВЭР-1000 в режимах: оперативного переключения включительно с пуском и выбегом, перехода на резервное питание, самозапуска двигателей с выбегом турбогенератора и без его выбега. Выполнено исследование процессов системы асинхронных двигателей в режиме оперативного переключения при их питании от турбогенератора и установлены основные закономерности их протекания в качественном и количественном соотношении. Библ. 10, рис. 11.

Ключевые слова: ядерный реактор, главные циркуляционные насосы, синхронный турбогенератор, трансформатор, асинхронный двигатель, пусковые режимы, самозапуск, математическая модель, дифференциальные уравнения.

Постановка проблеми та її актуальність. Аналіз наукових публікацій. На сьогодні в енергосистемі України експлуатується 4 АЕС на яких встановлено 13 реакторів ВВЕР-1000 та 2 реактори ВВЕР-440. Водо-водяні ядерні енергетичні реактори класу ВВЕР є двоконтурними [1-3]. Перший контур призначений для відведення теплової енергії від тепловидільних елементів, які встановлені в активній зоні реактора і в яких міститься ядерне паливо та відбувається реакція поділу ядер під дією теплових нейтронів [1, 2]. Теплоносієм слугує звичайна вода, яка водночас має функцію сповільнювача нейтронів, адже реактори класу ВВЕР працюють на теплових нейтронах, тобто на нейтронах низьких енергій. Теплоносій циркулює першим контуром, послідовними ланками якого слугують такі конструкційні елементи ядерної енергетичної установки: активна зона реактора, головні циркуляційні помпи (ГЦП), парогенератори та система водоводів.

Для відбору тепла з активної зони реактора необхідно забезпечити циркуляцію теплоносія в першому контурі. Таку функцію виконують ГЦП [2, 3]. На ядерних реакторах ВВЕР-1000 встановлено по чотири головні циркуляційні помпи марки ГЦН-195М потужністю до 6000 кВт і подачею теплоносія в обсязі 20000 м³/год. Кожна з цих pomp перекачує теплоносій через реактор і парогенератор, які разом з помпою і системою трубопроводів утворюють одну петлю [2].

Кожна з чотирьох ГЦП приводяться в рух окремим короткозамкненим асинхронним двигуном вер-

тикального виконання марки ВА3 215/109-6АМ05 потужністю 8000 кВт і напругою живлення 6,3 кВ [2, 4]. Головні циркуляційні помпи належать до відповідальних механізмів власних потреб (ВП). Закономірно, що до механізмів власних потреб АЕС ставиться високі вимоги стосовно надійності електропостачання двигунів, якими приводяться в рух ці механізми та до надійності їх роботи. Відмова електричних двигунів (ЕД) ГЦП АЕС через перерву в живленні або їх поломку може призвести до аварійної зупинки реактора та розвитку системної аварії – розгерметизації першого контуру і, як наслідок, – до викидів у атмосферу радіоактивних елементів, що становить небезпеку для життя персоналу електростанції, пошкодження її основного обладнання та шкідливого впливу на довкілля. Тому для надійного електропостачання електричних двигунів головних циркуляційних pomp ядерного реактора ВВЕР-1000 передбачено використання двох джерел живлення: робочого та резервного [2, 4].

Для дотримання передбачених інструкціями правил стосовно режимів роботи ЕД ГЦП необхідно мати чітке і однозначне розуміння та достовірну інформацію про перебіг електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цих двигунах з метою вчасного прийняття правильних рішень стосовно їх оперативного перемикання, проведення самозапуску, переходу на резервне та аварійне живлення і т.ін.

© К.М. Василів, Л.І. Мазуренко

Аналіз літератури вказує на те, що правила експлуатації ЕД ГЦП викладені тільки в посадових інструкціях для персоналу АЕС [3], в яких прописані алгоритми дій на виконання зазначених операцій включно з проведенням профілактичних ремонтів та які ґрунтуються лише на досвіді експлуатації без предметного аналізу перебігу процесів та проблем режимів роботи двигунів.

Необхідну інформацію про перебіг процесів можна отримати двома способами: 1) проведенням фізичних експериментів безпосередньо на електричних двигунах ГЦП; 2) проведенням комп'ютерного моделювання за допомогою програмного забезпечення, розробленого на базі математичних моделей високого рівня адекватності. Перший спосіб є доволі проблематичним, що пов'язано з обмеженнями доступу до систем ЕД ГЦП та практичною неможливістю проведення всіх необхідних експериментів. Другий таких обмежень не має, а тому вважається перспективним.

Питанню аналізу режимів роботи електричних двигунів механізмів ВП електричних станцій приділена доволі велика кількість наукових праць, а викладений в цих працях матеріал ґрунтується на класичній теорії електричних машин та 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. Це означає, що для застосування положень цих праць в практиці експлуатації електричних двигунів конкретних агрегатів ВП електричних станцій необхідні істотні доопрацювання цих матеріалів. В контексті сказаного очевидним є те, що на сьогодні не достатньо уваги надається питанням розробки інформаційно-технічних засобів аналізу режимів роботи електричних двигунів ВП електростанцій (ЕС), які були б придатні для безпосереднього їх застосування в практиці експлуатації ЕС загалом та АЕС, зокрема.

Однозначно, що більш достовірну інформацію в питаннях режимів роботи електричних двигунів ВП можна отримати на підставі розв'язку системи диференціальних рівнянь, які описують процеси не лише в усталених, але й в динамічних режимах роботи двигунів із застосуванням сучасних комп'ютерних систем.

Наведене вище дає підстави стверджувати, що розробка засобів аналізу режимів роботи електричних двигунів власних потреб АЕС, якими слугують математичні моделі і відповідне їм програмне забезпечення є актуальною науково-практичною проблемою.

Метою статті є розробка математичної моделі і відповідного їй програмного забезпечення як засобу дослідження режимів роботи системи асинхронних двигунів (АД) головних циркуляційних pomp ядерного реактора ВВЕР-1000 АЕС за допомогою сучасної комп'ютерної техніки.

Викладення основного матеріалу. Згідно з [2, 4] розподільні пристрої власних потреб АЕС виконують з однією системою збірних шин і з одним вимикачем на приєднання. Кількість секцій збірних шин власних потреб АЕС напругою 6,3 кВ або 10,5 кВ нормальної експлуатації вибирають залежно від: кількості ГЦП, допустимої кількості одночасно підключених ГЦП

без спрацювання аварійного захисту реактора та від кількості і потужності встановлених робочих трансформаторів ВП. На реакторах ВВЕР-1000 встановлено по 4 ГЦП, приводні асинхронні двигуни яких живляться від збірних шин 4-х окремих секцій нормальної експлуатації (СНЕ), перші дві з яких живляться від двох вторинних обмоток першого робочого трансформатора власних потреб (ТВП) першого ступеня трансформації, а первинна обмотка цього трансформатора приєднується до першого відгалуження генераторного струмопроводу. Другі дві СНЕ приєднані до другого відгалуження генераторного струмопроводу аналогічним чином. Обидва робочі ТВП виконані з однією первинною і двома вторинними обмотками, що забезпечує наявність чотирьох секцій нормальної експлуатації на блок. Кожен з двох робочих ТВП енергоблоку на базі ядерного реактора ВВЕР-1000 має потужність 63 МВ·А.

Виходячи з [2-4] та описаного вище, систему електричних двигунів ГЦП окреслимо як електротехнічний комплекс, електрична схема якого зображена на рис. 1. На цьому рисунку прийнята така система позначень: літерою М позначено трифазну електричну мережу, яка включає енергосистему разом з блочним трансформатором; написами ТВ, Т1, Т2, В1, В2, В3, В4 – парову турбіну генератора, два робочі ТВП та чотири вимикачі через які підключаються обмотки статорів асинхронних двигунів до вторинних обмоток ТВП, а написами D1, D2, D3, D4 – чотири асинхронні двигуни ГЦП; літерою G позначено синхронний турбогенератор (ТГ); літерою F – джерело живлення обмотки збудження ТГ; В5 – генераторний вимикач енергоблоку; P1 – P4 – головні циркуляційні помпи.

Решта позначення є такими: літерою ϕ позначено потенціали незалежних вузлів схеми, літерою i – струми фазних гілок структурних елементів, а літерою E – електрорушійну силу джерела постійної напруги електричного кола збудження турбогенератора. В нижніх індексах числами позначено номери незалежних вузлів, номери фазних гілок структурних елементів схеми та номери зовнішніх гілок структурних елементів. Буквами М, Т, G, D, F у нижніх індексах позначено належність струмів до зовнішніх гілок: мережі, трансформаторів, турбогенератора, асинхронних двигунів, джерела живлення обмотки збудження; надписами M_e та T_p – належність до внутрішніх струмів мережі та трансформаторів. Буквою S у нижніх індексах позначено належність фазних струмів до статорів асинхронних двигунів і турбогенератора, а буквою R – до струмів роторів асинхронних двигунів. Числами в дужках у верхньому індексі струмів позначено номер елемента з групи одного типу (трансформаторів, вимикачів та двигунів), до якого відноситься цей струм.

Для практики експлуатації енергоблоку АЕС на базі ядерного реактора ВВЕР-1000 актуальним є аналіз роботи структурних елементів системи асинхронних двигунів, зображеної на схемі рис. 1 в таких основних режимах:

1) робота турбогенератора G в нормальному режимі на енергосистему М з одночасним електроживленням

трансформаторів власних потреб Т1, Т2 і відповідно асинхронних двигунів D1 – D4;

2) живлення ТВП від енергосистеми через блочний трансформатор, коли турбогенератор відімкнений;

3) робота асинхронних двигунів ГЦП в ситуації аварійного знеструмлення з втратою зв'язку з енергосистемою і вимкнення турбогенератора через припинення подачі пари на турбіну, що переводить ТГ в режим вибігу. Такий режим конче необхідний для полегшення переходу на природну циркуляцію теплоносія в ядерному реакторі;

4) втрати електроживлення двигунів ГЦП та перехід на природну циркуляцію теплоносія в режимі ви-

бігу агрегатів ГЦП (двигунів разом з помпами). Для збільшення часу вибігу, що критично важливо, асинхронні двигуни облаштовують маховиками;

5) перехід на резервне живлення асинхронних двигунів, що супроводжується короткочасною перервою подачі напруги на ТВП на час дії автоматичного ввімкнення резерву. Внаслідок повторної подачі напруги відбувається дозапуск двигунів, тобто їх подальше розкручування до номінальної частоти обертання зі стану, в якому наявна менша від номінальної стартова частота обертання двигунів (в літературі «самозапуск»);

6) режим оперативного перемикавання асинхронних двигунів ГЦП.

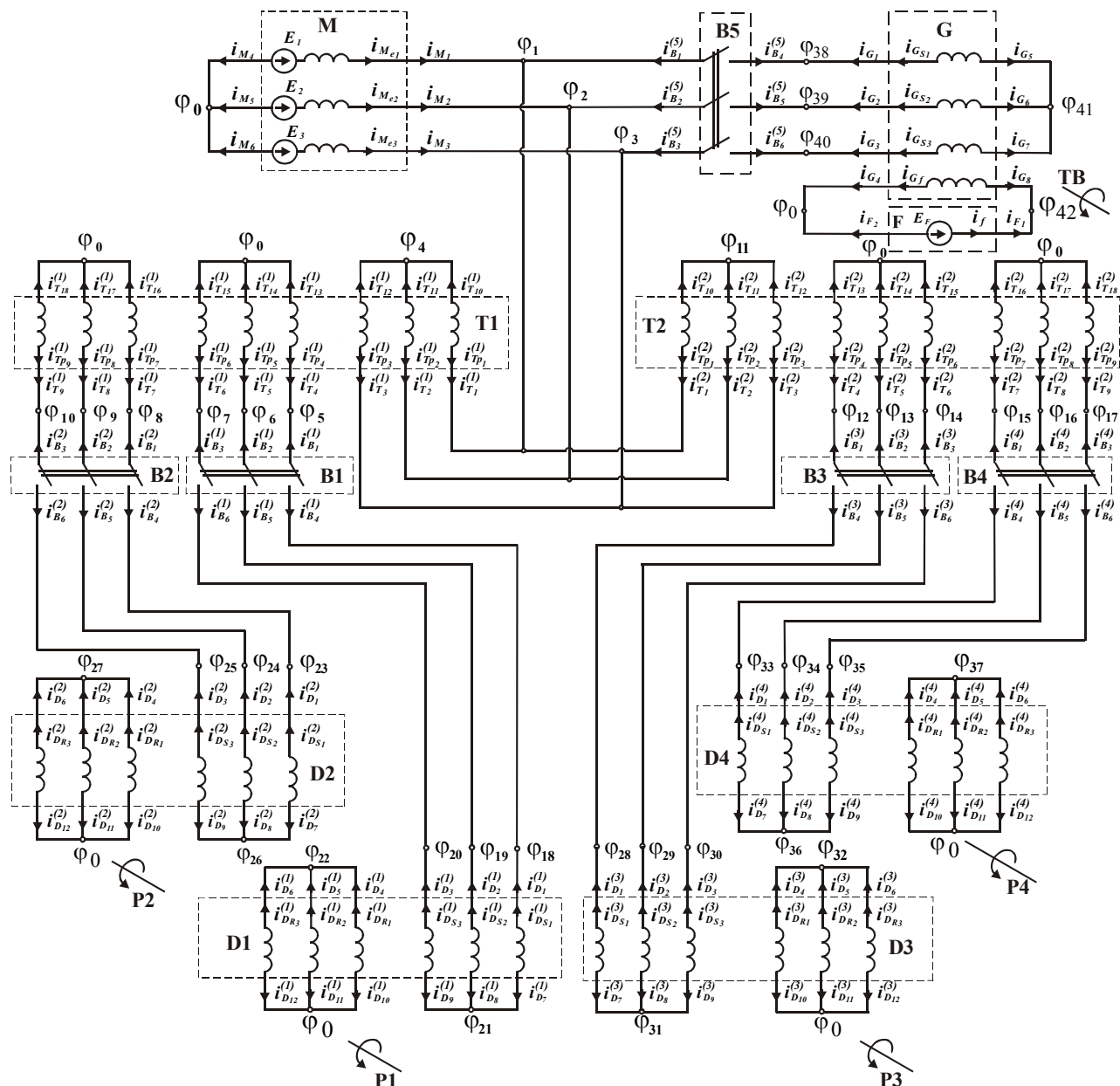


Рис. 1. Схема силового електричного кола системи асинхронних двигунів ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000

Математичну модель електротехнічного комплексу (ЕТК) «ТГ–ЕМ–Т–АД» розробимо на базі теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем (ЕМВС) [5] та низки інших напрацювань, викладених у [6-10]. Отже, математичною моделлю ЕТК «ТГ–ЕМ–Т–АД» є система диференці-

альних рівнянь електричного стану для схеми рис. 1 та диференціальних рівнянь механічного стану для асинхронних двигунів разом з ГЦП, турбогенератора разом з паровою турбіною, яка слугує джерелом первинного механічного крутильного моменту турбогенератора. Перша система рівнянь описує електромагнітні

процеси всієї схеми рис. 1, а друга – електромеханічні процеси, які відбуваються в асинхронних двигунах та турбогенераторі. Система рівнянь електричного стану записана у фазних координатах та разом з рівняннями механічного стану орієнтована на явні методи чисельного інтегрування.

Кожен із структурних елементів схеми (електрична мережа, трансформатори, вимикачі, асинхронні двигуни, турбогенератор, джерело постійної напруги живлення обмотки збудження ТГ) представлені багатополосниками у вигляді рівнянь, записаних за другим законом Кірхгофа [5, 6].

Розглянемо математичні моделі структурних елементів електротехнічного комплексу на прикладі математичної моделі турбогенератора.

Система рівнянь електричної та механічної рівноваги синхронного турбогенератора. Згідно з [5, 8] синхронний генератор представимо восьмиполосником, що охоплює три фази статора і обмотку збудження, який отриманий шляхом виключення контурів демпферної обмотки, представленої двома контурами по поздовжній d та поперечній вісі q . Демпферною обмоткою моделюється масив ротора турбогенератора.

Електричний стан синхронного генератора опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке має такий вигляд

$$p i_G + \Gamma_G \cdot \varphi_G + T_G = 0, \quad (1)$$

де $p = d/dt$ – оператор диференціювання за часом t ; $i_G = (i_{G_1}, i_{G_2}, i_{G_3}, i_{G_4}, i_{G_5}, i_{G_6}, i_{G_7}, i_{G_8})$ – вектор струмів зовнішніх гілок; $\varphi_G = (\varphi_{38}, \varphi_{39}, \varphi_{40}, \varphi_0, \varphi_{41}, \varphi_{41}, \varphi_{41}, \varphi_{42})$ – вектор зовнішніх потенціалів генератора;

$$\Gamma_G = \begin{bmatrix} L_G^{-1} & -L_G^{-1} \\ -L_G^{-1} & L_G^{-1} \end{bmatrix}; \quad T_G = \begin{bmatrix} L_G^{-1} \\ -L_G^{-1} \end{bmatrix} \times E \quad (2)$$

– матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів.

Компоненти матриці коефіцієнтів і вектора вільних членів з (2) визначаються за такими формулами:

$$L_G^{-1} = (L_{e,e} - L_{e,i} \cdot L_{i,i}^{-1} \cdot L_{i,e})^{-1};$$

$$E = p_0 \psi^Y \omega_G + R \cdot i - L_{e,i} \cdot L_{i,i}^{-1} \cdot (p_0 \psi_D^Y \omega_G + R_D i_D); \quad (3)$$

$$L_{e,e} = \frac{L_d - L_q}{3} \begin{bmatrix} \cos(2\gamma) & \cos(2\gamma - \rho) & \cos(2\gamma + \rho) & 0 \\ \cos(2\gamma - \rho) & \cos(2\gamma + \rho) & \cos(2\gamma) & 0 \\ \cos(2\gamma + \rho) & \cos(2\gamma) & \cos(2\gamma - \rho) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{L_d + L_q}{3} + \frac{L_0}{3} & \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma) \\ \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_d + L_q}{3} + \frac{L_0}{3} & \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma - \rho) \\ \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_0}{3} - \frac{L_d + L_q}{6} & \frac{L_d + L_q}{3} + \frac{L_0}{3} & \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma + \rho) \\ \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma) & \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma - \rho) & \frac{L_{ad}}{K_i} \cos(\gamma + \rho) & \frac{3}{2} \cdot \frac{(L_{ad} + L_{Gf})}{K_i^2} \end{bmatrix},$$

де $\rho = 2\pi/3$; K_i – коефіцієнт приведення струму збудження до струму статора.

Матриця взаємних індуктивностей між обмотками статора і збудження, з одного боку, і контурами

демперної обмотки по осях d, q , з другого боку, має такий вигляд

$$L_{e,i} = \begin{bmatrix} L_{ad} \cos(\gamma) & L_{aq} \sin(\gamma) \\ L_{ad} \cos(\gamma - \rho) & L_{aq} \sin(\gamma - \rho) \\ L_{ad} \cos(\gamma + \rho) & L_{aq} \sin(\gamma + \rho) \\ \frac{3 \cdot L_{ad}}{2 \cdot K_i} & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Матриця власних індуктивностей контурів демпферної обмотки має такий вигляд

$$L_{i,i} = \text{diag}(L_{ad} + L_{\sigma dD}, L_{aq} + L_{\sigma qD}). \quad (5)$$

Матриця взаємних індуктивностей між контурами демпферної обмотки і зовнішніми контурами (статора і обмотки збудження) має такий вигляд

$$L_{i,e} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_{ad} \cos(\gamma) & L_{ad} \cos(\gamma - \rho) & L_{ad} \cos(\gamma + \rho) & \frac{3 \cdot L_{ad}}{2 \cdot K_i} \\ L_{aq} \sin(\gamma) & L_{aq} \sin(\gamma - \rho) & L_{aq} \sin(\gamma + \rho) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Вектори ψ^Y, ψ_D^Y визначаються за формулами

$$\psi^Y = L_{e,e}^Y i + L_{e,i}^Y i_D, \quad \psi_D^Y = L_{i,e}^Y i, \quad (7)$$

де $L_{e,e}^Y, L_{e,i}^Y, L_{i,e}^Y$ – похідна матриць $L_{e,e}, L_{e,i}, L_{i,e}$ за кутом повороту γ ; $i_D = (i_{Dd}, i_{Dq})$ – вектор струмів контурів демпферної обмотки; $i = (i_{G_{S1}}, i_{G_{S2}}, i_{G_{S3}}, i_{G_f})$.

У формулах (4) – (7) L_d, L_q, L_0 – індуктивності по поздовжній, поперечній осях та індуктивність нульової послідовності; L_{ad}, L_{aq} – індуктивності, які відповідають реакції якоря по поздовжній та поперечній осях якоря; $L_{\sigma dD}, L_{\sigma qD}$ – індуктивності розсіяння демпферної обмотки по осях d, q .

Механічні процеси, які відбуваються в турбогенераторі, опишемо диференціальним рівнянням механічної рівноваги, яке має такий вигляд:

$$(J_{TB} + J_G) \cdot p \omega_G - (M_{TB} - M_G) = 0, \quad (8)$$

де J_{TB}, J_G – момент інерції турбіни та ротора генератора; $p \omega_G$ – похідна механічної кутової частоти обертання ротора генератора за часом t ; M_{TB} – механічний крутильний момент парової турбіни; M_G – електромагнітний момент генератора.

Враховуючи, що диференціальні рівняння електричного та механічного станів математичної моделі орієнтовані на явні методи чисельного інтегрування, важливим моментом в алгоритмі інтегрування цих рівнянь є визначення вектора інтегрування, в якому систематизовані всі координати, які входять до диференціальних рівнянь під знаком похідної та які як розв'язок отримуються безпосередньо шляхом інтегрування.

Вектор інтегрування для синхронного турбогенератора має таку структуру:

$$p v_G = (p i_{G_{S1}}, p i_{G_{S2}}, p i_{G_{S3}}, p i_{G_f}, p i_{G_d}, p i_{G_q}, p \gamma_G, p \omega_G), \quad (9)$$

де i_{G_d}, i_{G_q} – струми демпферної обмотки по осях d, q ; γ_G, ω_G – електричний кут повороту та механічна кутова частота обертання ротора генератора.

Математичні моделі вимикачів розроблені та описані в [6] з таким самим підходом (за модульним принципом), як і математична модель турбогенератора, а математичні моделі решти структурних елементів включно з асинхронними двигунами розроблені аналогічним чином, виходячи з [5, 8].

Безпосередньому інтегруванню системи диференціальних рівнянь електричного та механічного станів передують формування та розв'язування лінійної системи алгебричних рівнянь в базисі потенціалів незалежних вузлів електричної схеми рис. 1. Для цього з системи диференціальних рівнянь електричного стану виключається похідні струмів всіх електричних гілок схеми. Отримана таким чином система лінійних алгебричних рівнянь електричного стану має такий вигляд [5, 6]:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (10)$$

де A – матриця коефіцієнтів; B – вектор вільних членів; $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{42})$, – вектор потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1.

Матриця коефіцієнтів A та вектор вільних членів B системи рівнянь (10) формуються з матриць коефіцієнтів, векторів вільних членів та матриць інцидентії структурних елементів схеми рис. 1.

До математичної моделі електротехнічного комплексу схеми рис. 1 (окрім системи диференціальних рівнянь електричного та механічного станів) входить також система автоматичного керування, яка призначена для стабілізації напруги турбогенератора під час збільшення та зменшення навантаження на нього, а також для стабілізації частоти обертання ротора генератора, який приводиться в рух паровою турбіною. Для стабілізації напруги генератора застосовано пропорційно-інтегральний регулятор, робота якого описується таким рівнянням:

$$u_F = K_{uP}(u_z - u_{GS}^V) + K_{uI} \int (u_z - u_G) dt + u_{F0}, \quad (11)$$

де u_F, u_{F0} – поточне та початкове значення напруги збудження; u_z, u_{GS}^V – задане значення напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора (їх амплітуда); K_{uP}, K_{uI} – пропорційний та інтегральний коефіцієнти регулятора напруги.

Для стабілізації частоти обертання ротора генератора застосовано пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, робота якого описується таким рівнянням:

$$M_T = K_{\omega P}(\omega_z - \omega_G) + K_{\omega I} \int (\omega_z - \omega_G) dt + K_{\omega D} p(\omega_z - \omega_G) + M_{T0}, \quad (12)$$

де M_T, M_{T0} – поточне та початкове значення механічного крутильного моменту турбіни генератора; ω_z, ω_G – задане та поточне значення частоти обертання ротора генератора; $K_{\omega P}, K_{\omega I}, K_{\omega D}$ – пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти регулятора частоти обертання ротора генератора.

Алгоритм розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів. Основними вхідними даними слугують каталожні параметри: електричної мережі M ; трансформаторів власних потреб $T1, T2$;

асинхронних двигунів $D1, D2, D3, D4$; турбогенератора G та джерела постійної напруги F , а також початкові умови, які систематизовані у вектор інтегрованих змінних, що має таку структуру:

$$V = (V_M, V_T^{(1)}, V_T^{(2)}, V_B^{(1)}, V_B^{(2)}, V_B^{(3)}, V_B^{(4)},$$

$$V_D^{(1)}, V_D^{(2)}, V_D^{(3)}, V_D^{(4)}, V_B^{(5)}, V_G, V_F,$$

$$\int (u_z - u_{GS}^V) dt, \int (\omega_z - \omega_G) dt, t) =$$

$$= (i_{Me1}, i_{Me2}, i_{Me3},$$

$$i_{Tp1}^{(1)}, \dots, i_{Tp9}^{(1)}, i_{Tp1}^{(2)}, \dots, i_{Tp9}^{(2)},$$

$$i_{B1}^{(1)}, i_{B2}^{(1)}, i_{B3}^{(1)}, i_{B1}^{(2)}, i_{B2}^{(2)}, i_{B3}^{(2)},$$

$$i_{B1}^{(3)}, i_{B2}^{(3)}, i_{B3}^{(3)}, i_{B1}^{(4)}, i_{B2}^{(4)}, i_{B3}^{(4)},$$

$$i_{DS1}^{(1)}, i_{DS2}^{(1)}, i_{DS3}^{(1)}, i_{DR1}^{(1)}, i_{DR2}^{(1)}, i_{DR3}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, \quad (13)$$

$$i_{DS1}^{(2)}, i_{DS2}^{(2)}, i_{DS3}^{(2)}, i_{DR1}^{(2)}, i_{DR2}^{(2)}, i_{DR3}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)},$$

$$i_{DS1}^{(3)}, i_{DS2}^{(3)}, i_{DS3}^{(3)}, i_{DR1}^{(3)}, i_{DR2}^{(3)}, i_{DR3}^{(3)}, \gamma_D^{(3)}, \omega_D^{(3)},$$

$$i_{DS1}^{(4)}, i_{DS2}^{(4)}, i_{DS3}^{(4)}, i_{DR1}^{(4)}, i_{DR2}^{(4)}, i_{DR3}^{(4)}, \gamma_D^{(4)}, \omega_D^{(4)},$$

$$i_{B1}^{(5)}, i_{B2}^{(5)}, i_{B3}^{(5)},$$

$$i_{GS1}, i_{GS2}, i_{GS3}, i_{Gf}, i_{Gd}, i_{Gq}, \gamma_{GD}, \omega_{Gq},$$

$$\int (u_z - u_{GS}^V) dt, \int (\omega_z - \omega_G) dt, t).$$

Основними пунктами алгоритму розрахунку процесів є такі дії:

- на підставі початкових умов вектора V (13) і каталожних даних, формуються матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів структурних елементів (для турбогенератора (2)) і через них матриця коефіцієнтів A та вектор вільних членів B системи рівнянь електричного стану (10), яка розв'язується стосовно вектора φ ;

- на зворотному ході на підставі вектора φ потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1 визначають вектор інтегрування pV , який дорівнює похідній вектора інтегрованих змінних V (13) за часом t ($pV = dV/dt$);

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

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

За алгоритмом математичної моделі розроблено програмний комплекс. Нижче наведено узагальнений аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в системі асинхронних двигунів ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000 під час живлення трансформаторів власних потреб (а значить і асинхронних двигунів) від турбогенератора. В реальних умовах роботи енергоблоку частота обертання ротора турбогенератора є практично стабільною і такою, що відповідає частоті напруги енергосистеми. З метою забезпечення таких умов використаємо можливість математичної моделі і програмного комплексу, яка

дає змогу забезпечити абсолютно стабільну частоту обертання ротора генератора $\omega_G = \text{const}$ (хоча, як зазначено вище, в математичній моделі і програмному комплексі передбачена можливість розрахунку і динамічного електромеханічного процесу турбогенератора).

В цьому математичному експерименті для стабілізування напруги генератора під час оперативних перемикань асинхронних двигунів ГЦП застосовується відповідна система автоматичного керування (САК), яка описана вище (11).

Результатом математичного моделювання слугують розрахункові залежності основних координат, до яких віднесемо: напруги та струми всіх електричних гілок схеми рис. 1, електромагнітні моменти АД та моменти опору ГЦП, а також частоти обертання асинхронних двигунів.

Вхідними даними слугують каталожні дані турбогенератора включно з даними джерела живлення його обмотки збудження, асинхронних двигунів, трансформаторів власних потреб та електричної мережі. Тут необхідно акцентувати увагу на тому, що пуск АД ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000 виконується на повну напругу 6 кВ (прямий пуск), а механічний момент інерції обертової маси ротора разом з маховиком дорівнює $7250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Окрім цього до вхідних даних належить інформація допоміжного характеру, яка визначає режими роботи програмного комплексу (крок інтегрування, кінцевий час інтегрування і т.ін.).

Моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів виконаємо для такого режиму роботи асинхронних двигунів ГЦП: в стані рухомого з синхронною частотою ротора генератора в момент часу, який приймаємо початковим ($t = 0$) вмикається джерело живлення обмотки збудження генератора. На наступному етапі через 5 с та з інтервалом 5 с виконується пуск перших трьох АД (у моменти часу $t_1 = 5 \text{ с}$, $t_2 = 10 \text{ с}$ та $t_3 = 15 \text{ с}$). У момент часу $t_4 = 30 \text{ с}$ відмикається третій двигун, а в момент часу $t_5 = 40 \text{ с}$ вмикається ще й четвертий двигун. В момент часу $t_6 = 70 \text{ с}$ відмикаються всі три асинхронні двигуни, які на цей час працюють (перший, другий та четвертий).

Нижче викладено графіки розрахункових залежностей основних координат від часу та проведено їх аналіз на предмет фізики процесів і роботи електротехнічного комплексу приводу асинхронних двигунів головних циркуляційних pomp ядерного реактора ВВЕР-1000 під час живлення двигунів від турбогенератора енергоблоку атомної електричної станції.

На рис. 2. зображені розрахункові залежності фазних напруг статора генератора.

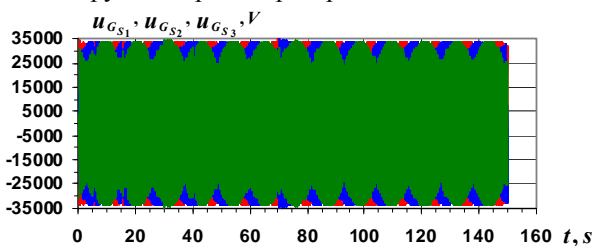


Рис. 2. $u_{G_{S1}}, u_{G_{S2}}, u_{G_{S3}}$ – фазні напруги генератора

На рис. 3 зображені розрахункові залежності фазних струмів генератора. Характер фазних напруг та

струмів на рис. 2 та рис. 3 відображає процеси пуску та вимкнення асинхронних двигунів. При цьому амплітуда фазних напруг рис. 2 залишається постійною під дією САК, а амплітуда фазних струмів рис. 3 змінюється залежно від роботи асинхронних двигунів.

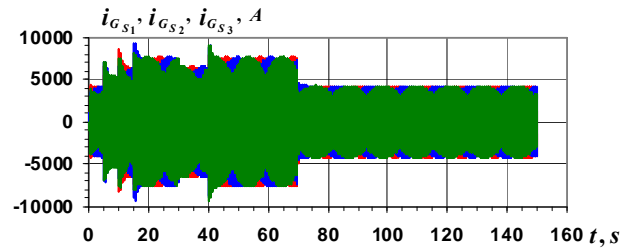


Рис. 3. $i_{G_{S1}}, i_{G_{S2}}, i_{G_{S3}}$ – фазні струми генератора

Більш виразну та предметну інформацію про характер фазних напруг та струмів в цьому режимі роботи генератора надають розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг та струмів статора генератора, які зображені на рис. 4.

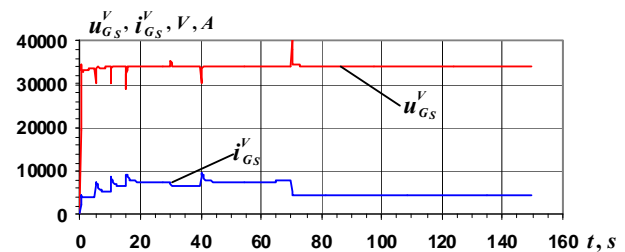


Рис. 4. $u_{G_S}^V, i_{G_S}^V$ – модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора турбогенератора

Характер кривих напруги та струму на рис. 4 виразно ілюструє закономірності зміни амплітуди фазних напруг та струмів статора генератора в режимі оперативного перемикання АД, а також реакцію та наслідки дії САК напруги.

З рис. 3 та рис. 4 видно, що на проміжку часу, коли АД вимкнені ($t > 70 \text{ с}$) фазні струми генератора не дорівнюють нулю, хоча напруга залишається стабільною. Це пояснюється тим, що на цьому проміжку часу обидва трансформатори власних потреб, які під'єднані до генератора, працюють в режимі неробочого ходу, а значить в їх первинних обмотках струм не дорівнює нулю в ситуації з вимкненими двигунами та має відповідне цьому режиму значення.

До функційно важливої інформації стосовно генератора належить інформація про характер його напруги та струму збудження. Тому на рис. 5 зображені розрахункові залежності цих координат.

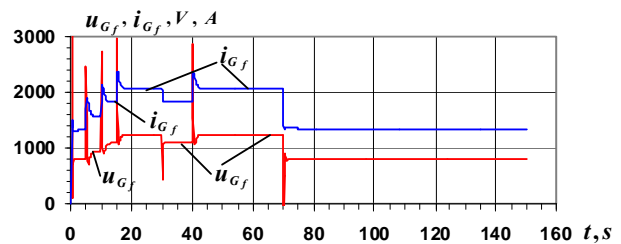


Рис. 5. u_{G_f}, i_{G_f} – напруга та струм збудження турбогенератора

Варто ще раз зазначити, що САК напруги статора генератора працює саме на функції модуля зображувального вектора фазних напруг (11).

З погляду роботи системи асинхронних двигунів ГЦП важливо мати інформацію про основні координати (напруги та струми) ТВП. В цьому контексті розглянемо та проаналізуємо напруги і струми первинної та двох вторинних обмоток першого ТВП. На рис. 6. зображені розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг первинної та двох вторинних обмоток першого ТВП.

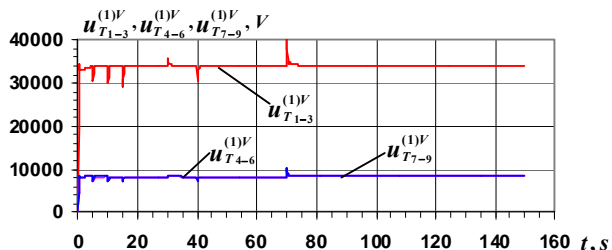


Рис. 6. $u_{T1-3}^{(1)V}, u_{T4-6}^{(1)V}, u_{T7-9}^{(1)V}$ – модулі зображувальних векторів напруг обмоток першого трансформатора ВП

З рисунку видно, що напруга первинної обмотки дуже близька до напруги генератора рис. 4, а напруга двох вторинних обмоток, значення яких збігаються, відповідає діючому значенню напруги 6,3 кВ, якою живляться асинхронні двигуни ГЦП. Очевидно, що напруги первинної та двох вторинних обмоток другого ТВП будуть ідентичними з напругами першого ТВП (рис. 6).

Аналогічно напругам, розглянемо струми обмоток обидвох трансформаторів власних потреб. Модулі зображувальних векторів струмів первинної і двох вторинних обмоток першого ТВП зображені на рис. 7.

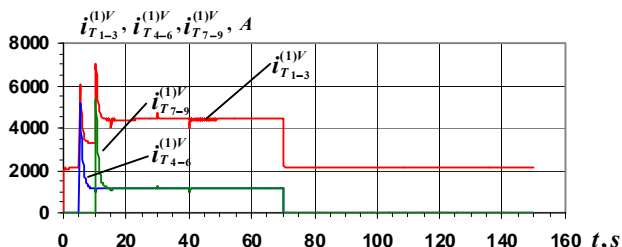


Рис. 7. $i_{T1-3}^{(1)V}, i_{T4-6}^{(1)V}, i_{T7-9}^{(1)V}$ – модулі зображувальних векторів струмів первинної і вторинних обмоток першого ТВП

Як і для першого – модулі зображувальних векторів струмів первинної і двох вторинних обмоток другого ТВП зображені на рис. 8.

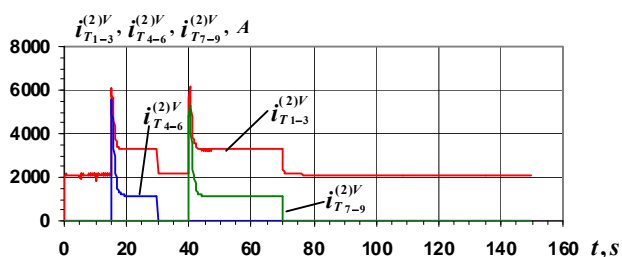


Рис. 8. $i_{T1-3}^{(2)V}, i_{T4-6}^{(2)V}, i_{T7-9}^{(2)V}$ – модулі зображувальних векторів струмів первинної і двох вторинних обмоток другого ТВП

Розрахункові залежності модулі зображувальних векторів струмів вторинних обмоток першого та другого ТВП, які зображені на рис. 7, 8 виразно ілюструють режими роботи асинхронних двигунів, які живляться від вторинних обмоток ТВП. На цих рисунках однозначно та чітко видно моменти ввімкнення та вимкнення всіх чотирьох АД, а також видно характер та кратність пускових струмів. Криві на рис. 7, 8 також несуть інформацію про характер та співвідношення струмів первинних і вторинних обмоток ТВП, а разом з рис. 4 ще й про співвідношення струмів первинних обмоток ТВП і турбогенератора.

У вторинних обмотках трансформаторів протікають ті самі струми, що і у відповідних їм статорних обмотках асинхронних двигунів, які з'єднані вимикачами. Тому аналіз струмів вторинних обмоток трансформаторів слугує водночас ним же для струмів статорів АД. Але для отримання більш повної інформації про струми статорних обмоток АД тут наведемо лише миттєві значення фазних струмів одного з довільно вибраних асинхронних двигунів, яким є перший. Отже, розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів першого АД зображені на рис. 9.

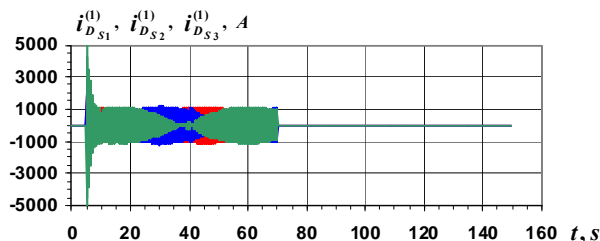


Рис. 9. $i_{Ds1}^{(1)}, i_{Ds2}^{(1)}, i_{Ds3}^{(1)}$ – миттєві фазні струми обмотки статора першого асинхронного двигуна

З рисунку видно, що крива модуля зображувального вектора струмів першої вторинної обмотки першого трансформатора $i_{T4-6}^{(1)V}$ на рис. 7 є такою, що огинає криві струмів з рис. 9, що однозначно відповідає фізиці електромагнітних процесів, які відбуваються в системі АД ГЦП за схемою на рис. 1.

Вище ми розглянули та проаналізували електромагнітні процеси, які описуються електричними координатами, до яких належать електричні напруги та струми.

Для повноти інформації стосовно можливостей математичної моделі та програмного комплексу в питанні аналізу режимів роботи асинхронних двигунів ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000 проаналізуємо електромеханічні процеси, які стосовно АД описуються їх крутильними електромагнітними моментами та механічними моментами опору ГЦП. На рис. 10 зображені розрахункові залежності цих координат.

З рисунку видно, що на етапі розгону першого АД і відповідно першої ГЦП електромагнітний момент двигуна істотно більший від моменту опору. В усталеному режимі вони зрівноважені, а на етапі вибігу електромагнітний момент двигуна дорівнює нулю, а механічний момент спадає із закономірністю зменшення механічної кутової частоти двигуна з помпою відповідно до механічних характеристик цілого агрегату ГЦП. Очевидно, що закономірності електро-

механічних процесів решти трьох двигунів є аналогічними, тому наводити їх немає потреби.

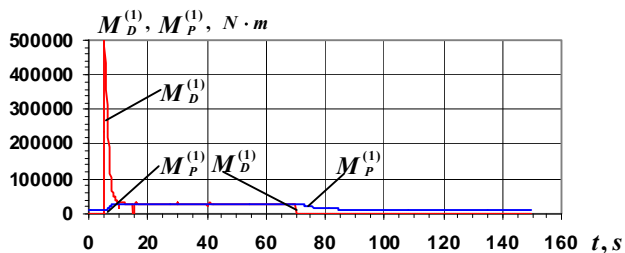


Рис. 10. $M_D^{(1)}$, $M_P^{(1)}$ – електромагнітний момент першого асинхронного двигуна та момент опору першої ГЦП

В питанні аналізу електромеханічних процесів АД ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000 принципово важливо мати інформацію про характер та закономірності зміни механічних кутових частот обертання роторів АД, адже саме ці координати визначають продуктивність роботи ГЦП, а відповідно роботи і ядерного реактора, і енергоблоку загалом. Тому на рис. 11 зображені розрахункові залежності механічних кутових частот обертання асинхронних двигунів ГЦП.

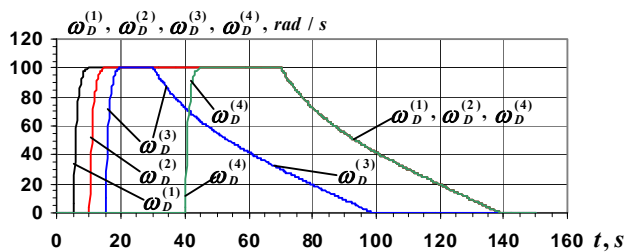


Рис. 11. $\omega_D^{(1)}$, $\omega_D^{(2)}$, $\omega_D^{(3)}$, $\omega_D^{(4)}$ – механічні кутові частоти обертання асинхронних двигунів ГЦП

З рисунку (на відміну від рисунків з кривими струмів) виразно видно не лише моменти вмкнення та вимкнення АД, але й час їх розгону та вибігу до повної зупинки. Така інформація є критично важливою в питаннях забезпечення успішного переходу на природну циркуляцію теплоносія в ядерному реакторі за обставин аварійного знеструмлення енергоблоку. З цією метою двигуни ГЦП додатково облаштовують маховиками, щоб збільшити час вибігу агрегату за системою АД-ГЦП.

Узагальнений аналіз кривих на рис. 11 та кривих всіх інших координат (моментів на рис. 10, струмів і напруг на всіх решті рисунках) показує, що їх характер повною мірою є у взаємовідповідності та в повному взаємозв'язку з погляду закономірностей перебігу і електромагнітних, і електромеханічних процесів, а разом з цим вказує на достатньо високий рівень адекватності як математичної, так і цифрової моделей. Такий результат досягнуто описом електромагнітних і електромеханічних процесів єдиною системою диференціальних рівнянь включно з САК напруги генератора та частоти обертання ротора генератора.

В перспективі передбачається виконати дослідження та провести аналіз процесів включно з переходом на резервне живлення, дозапуску (самозапуску) АД, а також аналіз вже згаданих режимів роботи з врахуванням динаміки руху ротора генератора.

До важливих перспективних досліджень (на необхідності проведення яких особливо наголошується в науково-технічній літературі [2, 4]) відносяться дослідження режимів роботи АД ГЦП під час переходу на природну циркуляцію теплоносія ядерного реактора із використанням вибігу турбогенератора, що очевидно становить як теоретичний, так і практичний інтерес в експлуатації енергоблоків АЕС на базі ядерного реактора ВВЕР-1000.

Висновки.

1. Аналіз наукових літературних джерел вказує на те, що особливості експлуатації електричних двигунів ГЦП викладені лише в посадових інструкціях для персоналу АЕС, в яких прописані правила виконання операцій: пуску, самозапуску, зупинки, переходу на альтернативні джерела живлення без предметного наукового аналізу закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. В наукових літературних джерелах явно бракує результатів спеціальних наукових досліджень стосовно цього питання. Наявність математичних моделей і відповідного програмного забезпечення як засобу комп'ютерного дослідження надала б змогу проводити дослідження режимів роботи системи АД ГЦП ядерного реактора ВВЕР-1000, необхідних як в теоретичному, так і в практичному аспекті експлуатації енергоблоків АЕС.

2. Розроблено математичну модель системи асинхронних двигунів ГЦП, яка враховує найважливіші визначальні чинники, що впливають на перебіг електромагнітних і електромеханічних процесів, серед яких: взаємний вплив структурних елементів схеми системи АД, вплив САК на роботу системи збудження ТГ, взаємний вплив АД і ГЦП, які приводяться в рух цими двигунами, а також дає змогу досліджувати роботу ГЦП під час самозапуску АД та їх роботу під час вибігу ротора ТГ.

3. Розроблено математичну модель, яка дає змогу виконувати дослідження найважливіших режимів роботи системи асинхронних двигунів ГЦП за допомогою сучасної комп'ютерної техніки.

4. В першому наближенні проведено дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів системи асинхронних двигунів ГЦП. Зокрема, досліджено пускові режими, отримані якісні і кількісні параметри вибігу двигунів з великими маховими масами, що (на думку авторів) також становить предмет нового наукового результату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 44: Традиционная энергетика. Атомные электрические станции: ретроспектива, состояние и перспективы их развития // Электротехника і електромеханіка. – 2018. – №3. – С. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.01.
2. Топольницький М.В. Атомні електричні станції. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. – 562 с.
3. Шевченко В.В., Космин С.М. Особенности работы приводных двигателей технологических насосов реакторной зоны АЭС // Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського. – 2010. – №4(63). – Частина 2. – С. 79-83.

4. Фельдман М.Л., Черновец А.К. Особенности электрической части атомных электростанций. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отдел., 1983. – 172 с.
5. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.
6. Васильв К.М. Математична модель режимів роботи системи асинхронних двигунів димотягів теплових електричних станцій // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №3. – С. 19-26. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.03.
7. Поляк Н.А. Современные крупные двухполюсные турбогенераторы. Электромагнитные характеристики. – М.: Энергия, 1972. – 472 с.
8. Фильц Р.В. Математические основы теории электро-механических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.
9. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.
10. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. – IEEE Press, 2002. – 632 p.

REFERENCES

1. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 44: Traditional power engineering. Nuclear power stations: retrospective view, state and prospects of their development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.3, pp. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.01.
2. Topolnytskyi M.V. *Atomni elektrychni stantsii* [Nuclear power stations]. Lviv Polytechnic National University Publ., 2004. 562 p. (Ukr).
3. Shevchenko V.V., Kosmyn S.M. Features of work of drives engines technological pumps of reactor area of nuclear power plant. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2010, no.4(63), part 2, pp. 79-83. (Rus).
4. Feldman M.L., Chernovets A.K. *Osobennosti elektricheskoi chasti atomnykh elektrostantsii* [Features of the electrical part of nuclear power plants] Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1983. 172 p. (Rus).
5. Plakhtyna E.H. *Matematicheskoe modelirovanie elektromashinno-ventil'nykh sistem* [Mathematical modeling of electric machine-valve systems]. Lvov, Vyshcha shkola Publ., 1986. 164 p. (Rus).
6. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.3, pp. 19-26. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.03.
7. Poliak N.A. *Sovremennye krupnye dvukhpoliusnye turbogeneratory. Elektromagnitnye kharakteristiki* [Modern large bipolar turbogenerators. Electromagnetic characteristics]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 472 p. (Rus).

8. Fylts R.V. *Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei* [Mathematical foundations of the theory of electromechanical converters]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1979. 208 p. (Rus).
9. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny*. [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 607 p. (Rus).
10. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. IEEE Press, 2002. 632 p.

Надійшла (received) 09.09.2019

Васильв Карл Миколайович¹, д.т.н., проф.,
 Мазуренко Леонід Іванович², д.т.н., проф.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
 e-mail: karl.vasylyv@gmail.com
² Інститут електродинаміки НАН України,
 03057, Київ, пр. Перемоги, 56,
 e-mail: mlins@ied.org.ua

K.M. Vasylyv¹, L.I. Mazurenko²

¹ Lviv Polytechnic National University,
 12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

² The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
 56, prospect Peremogy, Kiev, 03057, Ukraine.

A mathematical model of the electrical engineering complex for drive of main circulation pumps of nuclear reactor VVER-1000 of nuclear power plants.

Tools for computer investigation of the modes of operation of induction motors of the main circulating pumps of the VVER-1000 NPP reactor have been created. The mathematical model of the electrical engineering complex «synchronous turbogenerator of NPP unit – electric grid of power system – two transformers of own needs – four induction motors» in phase coordinates, oriented on explicit methods of numerical integration of the system of differential equations is developed. On the basis of the mathematical model the software designed for the study of electromagnetic and electromechanical processes of the system of induction motors of the main circulating pumps of the VVER-1000 nuclear reactor in the modes of: operative switching including start and run, switching to standby power, self-start of the motors with turbogenerator's run-out and without it is developed. The investigations of the processes in the system of induction motors in the mode of operative switching during their power supply from the turbogenerator are carried out and the basic regularities of their course in qualitative and quantitative relations are established. References 10, figures 11.

Key words: nuclear reactor, main circulation pumps, synchronous turbogenerator, transformer, induction motor, starting modes, self-starting, mathematical model, differential equations.