

ПОЛЬОВА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРА З ЕКВІВАЛЕНТОВАНИМИ ЗУБЦЕВИМИ ЗОНАМИ СТАТОРА І РОТОРА

In paper the simplified field mathematical model of the turbogenerator, in which tooth zones of the stator and rotor equivalent by continuous anisotropic medium is proposed.

Вступ

Побудова польових математичних моделей електротехнічних пристроїв, надалі залишається актуальною задачею, оскільки відкриває нові можливості для дослідження електромагнітних процесів, що протікають в них.

Складність і громіздкість алгоритмів, низка нерозв'язаних теоретичних питань, тривалість комп'ютерних розрахунків та проблеми пов'язані зі стійкістю розв'язків, на сьогодні, вже не є непереборною перешкодою для розробки найбільш потужного і досконалого інструменту вивчення фізичних явищ в електротехнічних об'єктах (і не тільки електромагнітних) – польових математичних моделей.

Основною перевагою польових моделей є точність опису електромагнітних процесів у пристроях, що залежить від прийнятих при їх побудові допущень.

Найбільш необхідні на практиці тривимірні польові моделі. Розробити такі моделі без розв'язання теоретичних і алгоритмічних проблем, які виникають при побудові двовимірних моделей, складно. Точність двовимірних моделей визначається не тільки допущеннями, прийнятими для методів теорії поля, але і тих допущень, які привносяться в модель з теорії електромагнітних кіл.

У двовимірних моделях завжди присутні деякі абстрактні коефіцієнти з теорії кіл (індуктивності розсіяння обмоток і т. д.), від значень яких у значній мірі залежить результуюча точність розробленої моделі. Цього недоліку позбавлені тривимірні моделі.

Загальні підходи до побудови польових моделей турбогенератора та деякі результати розрахунків режиму холостого ходу приведено в роботах [1, 2].

Запропонована стаття є логічним продовженням вказаних робіт, у якій більш детально розглядаються особливості побудови польових моделей турбогенератора та складності, які при цьому виникають.

Досвід розробки польових математичних моделей електромеханічних пристроїв, алгоритмів розрахунку та аналіз результатів комп'ютерного симулювання показують, що створення єдиної польової математичної моделі турбогенератора, призначеної для розрахунку всеможливих режимів роботи ре-

ального пристрою, практично неможливо. Аналіз експлуатаційних режимів турбогенератора необхідно проводити на основі використання декількох моделей: моделі, призначеної для розрахунку режиму холостого ходу, моделі комп'ютерного симулювання режиму короткого замикання і моделі, за допомогою якої досліджують робочі режими турбогенератора. Це пов'язано не тільки з особливістю розрахунку електромагнітного поля в рухомих середовищах [3] і обмеженнями у використанні польового підходу до опису електромагнітних явищ лише в одні ланці складного електричного кола (турбогенераторі), але і з необхідністю дотримання законів комутації як в методах теорії поля, так і методах теорії кіл.

Розробка математичної моделі

У зв'язку з тим, що результати розрахунку режиму холостого ходу є необхідними даними для комп'ютерного моделювання інших режимів пристрою, розглянемо побудову польової математичної моделі, призначеної для симулювання режиму холостого ходу.

Поперечний переріз зон турбогенератора, в яких проводиться розрахунок електромагнітного поля, приведено на рис. 1: $0 \div R_1$ – зона масивного тіла ротора; $R_1 \div R_2$ – еквівалентована зубцева зона ротора; $R_2 \div R_3$ – зона повітряного проміжку між статором і ротором; $R_3 \div R_4$ – еквівалентована зубцева зона статора; $R_4 \div R_5$ – еквівалентована зона шихтованого тіла статора; $R_5 \div R_6$ – повітряна зона на зовні турбогенератора.

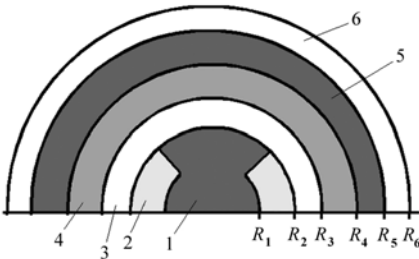


Рис. 1. Зони поперечного перерізу турбогенератора

допущення, конструктивні особливості пристрою і т. д.

В задачах математичного моделювання електромагнітного поля електродинамічних пристроїв доцільно використовувати рівняння, записані відносно векторного і скалярного потенціалів. Їх розв'язання приводить до отримання просторово-часових значень шуканих функцій, а, і відповідно, до вичерпної інформації про електромагнітне явище в цілому. При цьому перехід до векторів **H**, **E**, **B**, **D** здійснюється без особливих труднощів. До недоліків такого підходу необхідно віднести значне ускладнення розрахункового процесу, викликане використанням потенціалів у повних рівняннях. Необхідно також

В залежності від складності об'єкту математичного моделювання та умов постановки задачі розрахунок електромагнітного поля можна проводити у векторах **H**, **E**, **B**, **D** або в потенціалах **A**, ϕ . На вибір основної системи рівнянь впливає низка факторів: отримання мінімально можливої кількості рівнянь для опису електромагнітного процесу, зручність знаходження граничних і крайових умов для основних рівнянь, прийняті в моделі

прийняти таке калібрування векторного і скалярного потенціалів, яке б у найбільшій мірі відповідало процесам, що моделюються в фізичних об'єктах та спрощувало алгоритм розрахунку, забезпечуючи при цьому інваріантність переходу від потенціалів отриманих виразів до основних векторів [4].

Для опису електромагнітних процесів при побудові польових математичних моделей найбільш часто використовується рівняння

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla \times (\mathbf{v} \nabla \times \mathbf{A}), \quad (1)$$

за умови калібрування потенціалів $\nabla \varphi = 0$, де \mathbf{A} – векторний потенціал електромагнітного поля; γ – електропровідність середовища; ε – діелектрична проникність середовища; \mathbf{v} – обернена магнітна проникність середовища.

Вираз (1) надлишковий, оскільки містить в собі другу часову похідну по \mathbf{A} , що враховує струми зміщення. Враховувати їх у польових математичних моделях електротехнічних пристроїв немає необхідності. Відповідно, основне рівняння, яке використовується для опису електромагнітних явищ у всіх зонах пристрою, має вигляд

$$\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla \times (\mathbf{v} \nabla \times \mathbf{A}). \quad (2)$$

Розрахунок електромагнітного поля у двовимірному просторі проводиться у квазістационарному наближенні, тобто припускається аналогічність протікання процесів в будь-якому іншому поперечному перерізі пристрою вздовж його осі. Такий підхід привносить похибку в результати розрахунків, оскільки виключає можливість урахування реальних електромагнітних явищ, що протікають в торцевих зонах об'єкту.

Результуюче розрахункове рівняння квазістационарного поля отримують з (2)

$$\gamma \frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla \times (\mathbf{v} \nabla \times A), \quad (3)$$

де A – осьовий компонент функції векторного потенціала електромагнітного поля.

Все вище викладене позбавлено сенсу без акцентування уваги на системі координат, у якій розглядаються електромагнітні процеси.

У роботі [1] основне розрахункове рівняння електромагнітного поля для рухомих середовищ наведено у вигляді

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\Gamma^{-1} (\nabla \times (\mathbf{N} \nabla \times \mathbf{A}) \pm \delta) - \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A}, \quad (4)$$

де \mathbf{A} – векторний потенціал електромагнітного поля; Γ – матриця статичних електропровідностей; \mathbf{N} – матриця статичних обернених магнітних проникливостей середовища; δ – вектор сторонньої густини струму; \mathbf{v} – вектор лінійної швидкості, але при цьому не акцентується увага на тому, в якій системі координат з фізичної точки зору розглядаються значення векторного потенціала

зліва та справа від знаку рівності.

Вираз (4) містить в собі дві шукані функції векторного потенціала в різних системах відліку і тому не може піддаватись інтегруванню для знаходження просторово-часових значень електромагнітного поля. Детальний розгляд цього питання викладено в роботі [3].

Використання в математичній моделі комп'ютерного симулювання режиму холостого ходу турбогенератора рівняння (4) привело до значного збільшення жорсткості основної системи рівнянь, наслідком чого стала необхідність пошуку різних способів та методів подолання цієї проблеми (зміна кроку дискретизаційних сіток, зменшення напруги збудження турбогенератора, пошук та використання різних способів формування граничних і крайових умов, зменшення швидкості обертання ротора і т. д.). Найбільш ефективним виявився спосіб, який передбачає зменшення часового кроку інтегрування системи диференціальних рівнянь на декілька порядків.

Результати тривалих комп'ютерних розрахунків режиму холостого ходу турбогенератора на основі рівняння (4) продемонстрували невідповідність просторово-часових розподілів електромагнітного поля в зонах пристрою вказаному режиму. Отримано інший режим.

Значне збільшення жорсткості розрахункової системи рівнянь при використанні виразу (4) викликано привнесенням зовні силового розриву функції векторного потенціала в часі і в просторі.

У роботі [2] запропонована польова математична модель турбогенератора у фазних координатах, яка передбачає розрахунок електромагнітного поля в зонах поперечного перерізу пристрою у власних системах відліку. В моделі рух ротора реалізується перерахунком граничних умов на лінії розділу середовищ, що знаходяться в різних системах координат. Такий підхід не приводить до просторово-часового розриву функції векторного потенціала, але вибраний спосіб врахування переміщення середовищ не відповідає режиму холостого ходу турбогенератора.

Теоретичний матеріал робіт [1, 2], який розкриває методи розрахунку електромагнітного поля в рухомих середовищах, загальновідомий і не викликає сумніву. Але для побудови реально діючих польових моделей симулювання різних режимів електродинамічних пристроїв необхідно брати до уваги системи координат, в яких проводиться математичний опис процесів, а також аналізувати, який режим відтворює розроблений алгоритм розрахунку.

Розробка польової моделі турбогенератора для комп'ютерного симулювання режиму холостого ходу, вимагає більш детального аналізу особливостей протікання фізичних процесів пристрою у вказаному режимі.

В цьому режимі джерелом електромагнітного поля в пристрої є обмотка збудження. У системі координат, пов'язаній з обмоткою збудження, протікання електромагнітного процесу в роторі відповідає процесам у звичайному дроселі. При цьому різні швидкості обертання не впливають на електромагнітні процеси ротора. Таким чином, моделювання електромагнітного поля в еквівалентованих зубцевих зонах і масивному електропровідному тілі ротора

зручно здійснювати в системі відліку, пов'язаній з ротором.

Для цього використовуються відомі вирази [1, 2]

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\Gamma^{-1}(\nabla \times (\mathbf{N} \nabla \times \mathbf{A}) \pm \delta); \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\Gamma^{-1} \nabla \times (\mathbf{N} \nabla \times \mathbf{A}), \quad (6)$$

де \mathbf{A} – векторний потенціал електромагнітного поля в системі координат рухомого ротора.

Рівняння (5) описує електромагнітні процеси в заструмлених зубцевих зонах ротора, а вираз (6) – процеси у його масивному тілі.

При побудові польової математичної моделі режиму холостого ходу турбогенератора були прийняті наступні допущення: не враховуються втрати на перемагнічування матеріалів статора і ротора; електромагнітний процес моделюється в плоско-паралельному наближенні та без врахування складової струмів зміщення. У зв'язку з прийнятими допущеннями, в режимі холостого ходу в статорі відсутні будь-які макро- та мікроструми, обумовлені обертанням магнітного поля ротора, що впливають на загальну картину процесу.

У випадку еквівалентування зубцевої зони статора суцільним анізотропним середовищем електромагнітний процес у статорі не залежить від швидкості і напрямку обертання магнітного поля ротора, а залежить тільки від взаємного розміщення систем координат статора і ротора в момент спостереження.

Таким чином можна зафіксувати довільне взаємне розміщення статора та ротора і одночасно провести розрахунок електромагнітних процесів у всіх зонах поперечного перерізу пристрою у системі координат ротора. При переході до фізичних координат зміна в часі векторного потенціала в довільній точці нерухомого статора здійснюється простим переміщенням просторового розподілу електромагнітного поля на відповідну кутову координату.

Необхідно підкреслити, що не дивлячись на фіксування взаємного розміщення статора і ротора, розрахунок електромагнітного поля в повітряному проміжку між ними, еквівалентованій зубцевій зоні статора, в тілі статора і в повітрі на зовні турбогенератора, відбувається за допомогою рівнянь, які містять функцію векторного потенціала в одній приведеній системі відліку, яка пов'язана з вказаними середовищами, але дотримуючись фізичної адекватності математичного опису процесів, електромагнітні явища у всіх зонах поперечного перерізу пристрою розглядаються в системі координат ротора.

При моделюванні режиму холостого ходу турбогенератора, з урахуванням прийнятих допущень, фіксуванням взаємного розміщення статора і ротора здійснюється приведення системи координат статора до системи координат ротора.

Для розрахунку електромагнітного поля в зубцевій зоні статора використовують рівняння (6), а в тілі статора вираз [1, 2]

$$0 = \nabla \times \mathbf{N} \nabla \times \mathbf{A}. \quad (7)$$

Електромагнітний процес в зонах повітряних проміжків розраховується за допомогою рівняння

$$0 = \nu_0 \nabla \times \nabla \times \mathbf{A}, \quad (8)$$

де ν_0 – обернена магнітна проникливість повітря.

Існує інший, алгоритмічно більш складний, спосіб комп'ютерного симулювання електромагнітного поля турбогенератора в режимі холостого ходу. Він викладений у роботі [2] і зводиться до розрахунку електромагнітного процесу у всіх зонах у власних системах координат, а обертання ротора здійснюється механічним переміщенням середовищ (дискретизаційних сіток рухомого ротора і нерухомого статора) вздовж кутової координати з дотриманням умови

$$\Delta\alpha = \omega\Delta t, \quad (9)$$

де $\Delta\alpha$ – крок дискретизаційної сітки по куту; Δt – крок часового інтегрування системи диференціальних рівнянь; ω – кутова швидкість обертання ротора.

Механічне переміщення систем координат приводить до зміни в часі функції векторного потенціала у довільній точці спостереження поперечного перерізу зон статора. Оскільки

$$\frac{\partial A}{\partial t} \neq 0, \quad (10)$$

то, виникає деяка напруженість електричного поля E .

В зонах повітряного простору і в шихтованій зоні тіла статора для опису електромагнітних процесів використовують рівняння (8) і (7). Поява E в цих зонах не викликає утворення наведеної густини струму. Це відповідає особливостям протікання фізичних явищ у вказаних зонах в режимі холостого ходу з урахуванням прийнятих допущень.

Для розрахунку електромагнітного поля в еквівалентованій зубцевій зоні статора використовується вираз (6) [2]. Згідно з (6), зміні A в часі в зубцевій зоні будуть протидіяти струми провідності середовища, тим самим фактично відбувається моделювання не режиму холостого ходу, а симетричного короткого замикання обмоток статора турбогенератора.

При побудові двовимірної польової моделі холостого ходу турбогенератора на основі алгоритму, що передбачає фізичне переміщення рухомої і нерухомої систем координат, розрахунок поля в електропровідній зубцевій зоні статора необхідно проводити за допомогою рівняння (7), яке виключає появу вектора просторової густини струму в зоні обмотки, як реакцію на обертання поля ротора у моделюємому режимі.

Викладені підходи до розробки польової математичної моделі турбогенератора адекватні фізичним процесам у пристрої, з урахуванням прийнятих допущень. При цьому другий спосіб моделювання поля в рухомих середовищах є більш складним і вимагає проведення тривалих комп'ютерних розрахунків.

Успіх побудови математичної моделі турбогенератора в значній мірі залежить від методів формування граничних і крайових умов для рівнянь поля

на розділах розрахункових зон. У роботах [1, 2] приведено один із варіантів знаходження таких умов. Запропонований в них спосіб визначення векторного потенціала на границях зон доцільно використовувати для середовищ із незначною нелінійністю. У випадку розрахунку електромагнітних процесів у зонах пристроїв з урахуванням реальних нелінійних характеристик матеріалів, рівняння поля на внутрішніх та зовнішніх межах стають основним джерелом числової нестійкості моделі. Особливо це стосується виразів, що використовуються для знаходження значень векторного потенціала на зовнішніх границях поперечного перерізу пристрою.

Подолати проблему нестійкості розв'язку рівнянь поля в середовищах зі значною нелінійністю вдалось за допомогою комплексу заходів, серед яких найбільш дієвим виявився удосконалений підхід до визначення крайових і граничних умов, викладений в роботах [5].

На відміну від виразів для розрахунку значень поля на границях зон, що використовуються у роботах [1, 2], які забезпечують неперервність тільки функції векторного потенціала на внутрішніх і зовнішніх межах, запропонований метод передбачає забезпечення неперервності не тільки функції A , але і узгодженість розриву першої і другої просторових похідних векторного потенціала зліва та справа від лінії розділу з реальними магнітними характеристиками середовищ [5].

Нові вирази для визначення значень векторного потенціала на зовнішній межі поперечного перерізу турбогенератора мають вигляд

$$A_{i=m+1} = 2A_{i=m} - A_{i=m-1}, \quad (11)$$

де i – індекс, що відповідає вузлам просторової сітки в циліндричній системі координат вздовж радіуса.

Крайові умови вздовж радіусів зон інтегрування системи рівнянь поперечного перерізу турбогенератора формуються на основі періодичності електромагнітного процесу на полюсному діленні пристрою, як для функції векторного потенціала, так і її перших і других просторових похідних. Виходячи з цього, розрахункові вирази для вказаних меж використовують у вигляді

$$\begin{aligned} A_{k=1} &= 2A_{k=2} + 2A_{k=n-1} - A_{k=3} - A_{k=n-2} - A_{k=n}; \\ A_{k=n+1} &= A_{k=2} + A_{k=4} + A_{k=n-1} - 2A_{k=3} - 2A_{k=n}, \end{aligned} \quad (12)$$

де k – індекс, що відповідає відповідним вузлам просторової сітки вздовж кутової координати.

Для граничних умов на внутрішніх розділах зон турбогенератора необхідно використовувати нові співвідношення

$$A_i = \frac{(v_{\alpha i+1} - v_{\alpha i-1})(A_{i+1} - A_{i-1})\Delta r_1 \Delta r_2}{2(v_{\alpha i-1} \Delta r_2 + v_{\alpha i+1} \Delta r_1)(\Delta r_1 + \Delta r_2)} + \frac{v_{\alpha i-1} \Delta r_2 A_{i-1} + v_{\alpha i+1} \Delta r_1 A_{i+1}}{v_{\alpha i-1} \Delta r_2 + v_{\alpha i+1} \Delta r_1}; \quad (13)$$

$$A_k = \frac{(v_{rk+1} - v_{rk-1})(A_{k+1} - A_{k-1})\Delta\alpha_1\Delta\alpha_2}{2(v_{rk-1}\Delta\alpha_2 + v_{rk+1}\Delta\alpha_1)(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)} + \frac{v_{rk-1}\Delta\alpha_2 A_{k-1} + v_{rk+1}\Delta\alpha_1 A_{k+1}}{v_{rk-1}\Delta\alpha_2 + v_{rk+1}\Delta\alpha_1}. \quad (14)$$

де $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2$ – кроки дискретизацій цих сіток у відповідних координатах.

Форма виразів, за допомогою яких враховуються нелінійні електромагнітні характеристики матеріалів середовищ, також у значній мірі впливає на числову стійкість польових математичних моделей пристроїв. Результати комп'ютерних розрахунків показали, що найбільш ефективним для цього є використання кубічних сплайнів виду

$$v(B) = \sum_{m=1}^3 a_i^{(k)} (B_k - B)^m, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

де n – кількість розбиття відрізків вздовж осі B .

У діючій моделі значення n вибрано рівним 30, це дало можливість забезпечити плавність переходу функції і її похідних між відрізками нелінійних характеристик аж до ділянки сильного насичення магнітних матеріалів. Математичне моделювання нелінійних властивостей середовищ за допомогою поліномів різного степеня виявилось малоефективним.

Крім викладених способів підвищення числової стійкості моделі, в зонах нестійких розв'язків здійснюється автоматичне локальне збільшення кількості вузлів дискретизаційної сітки

Анізотропні електромагнітні характеристики зубцевих зон статора і ротора, зони шихтованого тіла статора розраховуються за допомогою відомих співвідношень [1, 2]

$$v_r = \frac{d_f + v_0 \cdot d_0 / v}{d_f + d_0} \cdot v; \quad v_r = \frac{d_f + d_0}{d_f + v \cdot d_0 / v_0} \cdot v;$$

$$\gamma = \frac{\gamma_f d_f + \gamma_{Cu} \cdot d_0}{d_f + d_0}, \quad (16)$$

де γ_f – електропровідність матеріалу ротора; γ_{Cu} – електропровідність міді; d_f, d_0 – ширина зубця та пазу, або феромагнітного листа та ізоляції шихтованого статора.

У роботах [1, 2] основне рівняння обмотки ротора використовується у вигляді

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = u_f - r_f i_f, \quad (17)$$

де Ψ_f, u_f, i_f – повне потокозчеплення, напруга та струм обмотки ротора.

Струм обмотки ротора розраховують за допомогою виразу

$$i_f = (\Psi_f - \psi_f) / L_f, \quad (18)$$

де L_f – індуктивність розсіяння лобових частин обмотки.

Робоче потокозчеплення обмоток намагнічування знаходять за допомогою співвідношення

$$\Psi_f = w_f k_f l_r \sum_{i=1}^n A_{Ri}, \quad (19)$$

де w_f – кількість витків обмотки ротора; l_r – осьова довжина обмотки; A_{Ri} – значення функції векторного потенціала в системі координат ротора у вузлах сітки, що попадають в зону обмотки; k_f – коефіцієнт, що враховує кількість вузлів вздовж кутової координати α , що попадають в зону обмотки ротора.

Як показали результати комп'ютерного симулювання режиму холостого ходу турбогенератора, в усталених процесах існує множина варіантів значень шуканих функцій Ψ , ψ , i , що задовольняють рівнянням (17)-(19). Це особливо проявляється при розрахунку електромагнітного поля в нелінійних середовищах.

Оскільки, визначальною величиною при моделюванні розглядуваного режиму є значення струму обмотки збудження, точність знаходження вказаної змінної впливає на точність розрахунку всіх інших величин.

Для усунення існуючих неоднозначностей розв'язків, продиференціюємо по часу рівняння (18) і проведемо підстановку (17), (19) у результуючий вираз. Таким чином, отримаємо

$$\frac{di_f}{dt} = \left(u_f - r_f i_f - \frac{d\Psi_f}{dt} \right) / L_f, \quad (20)$$

де

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = w_f k_f l_r \sum_{i=1}^n \frac{\partial A_{Ri}}{\partial t}. \quad (21)$$

За допомогою рівняння (20) знаходимо значення струму збудження в перехідних і усталених режимах турбогенератора.

Співвідношення (20) забезпечує однозначність рівноваги електричних і магнітних величин у модельованих процесах обмотки ротора.

Похибка знаходження i_f за допомогою виразу (20) не залежить від режиму, що досліджується і форми нелінійних характеристик матеріалів. Про це свідчать отримані результати комп'ютерного симулювання.

Розрахунок напруг фаз обмоток статора здійснюється за допомогою відомих виразів [2]

$$u_i = \frac{d\Psi_i}{dt} = w_i k_i l \sum_{m=1}^n \frac{\partial A_{Si}}{\partial t}, \quad i = A, B, C, \quad (22)$$

де u_i – напруга обмоток статора; w_i – кількість витків обмотки статора у кожній фазі; l – осьова довжина обмотки; A_{Si} – значення функції векторного потенціала у вузлах просторової дискретизаційної сітки, зв'язаної з системою координат нерухомого статора, які попадають в зону обмоток.

Результати комп'ютерного симулювання

За допомогою розробленої польової моделі було проведено комп'ютерні розрахунки електромагнітного поля в поперечному перерізі турбогенератора в перехідному процесі режиму холостого ходу, для випадку використання лінійних і нелінійних електромагнітних характеристик середовищ. Результати розрахунку приведені на рис. 2 – рис. 10.

Рис. 2 і рис. 3 демонструють просторові розподіли модуля вектора магнітної індукції в системі координат ротора на полюсному діленні турбогенератора в момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу лінійної і нелінійної моделей, відповідно.

На рис. 4 і рис. 5 приведено розподіли модуля вектора магнітної індукції вздовж радіуса зон поперечного перерізу турбогенератора в момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу.

На рис. 6 і рис. 7 представлено розподіли модуля вектора магнітної індукції вздовж кутової координати з точки спостереження на зовні статора в момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу турбогенератора.

На рис. 8 і рис. 9 приведено еквіпотенціальні просторові розподіли модуля вектора магнітної індукції в зонах поперечного перерізу турбогенератора в момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу.

На рис. 10 показано часові значення напруги фази А обмотки статора після завершення перехідного процесу в лінійній (1) і нелінійній (2) моделях.

Вздовж радіуса вузли координатної сітки відповідають наступним зонам поперечного перерізу турбогенератора: $0 \div 54$ – зона масивного феромагнітного тіла ротора; $54 \div 75$ – еквівалентована зубцева зона ротора; $75 \div 87$ – зона повітряного проміжку між статором і ротором; $87 \div 117$ – еквівалентована зубцева зона статора; $117 \div 174$ – зона тіла статора; $174 \div 186$ – повітряна зона на зовні турбогенератора. Кількість вузлів дискретизаційної сітки вздовж кутової координати на полюсному діленні турбогенератора рівна 192.

Результати розрахунків показали, що при однакових значеннях струму збудження обмотки ротора значення модуля магнітної індукції в зонах поперечного перерізу турбогенератора менше по величині у випадку нелінійних середовищ. Це підтверджує адекватність відтворення фізичних процесів.

Особливої уваги заслуговують результуючі криві напруг, приведених на рис. 10. Як відомо, амплітудне значення напруги фаз турбогенератора ТГВ-500 рівне 16300 В. На рис. 10 амплітудне значення напруги в лінійній моделі складає 22000 В, а в нелінійній – 20000 В. В результаті, сама точна польова модель турбогенератора приводить до похибки в лінійному варіанті 35%, а в нелінійному – 23%. Ніякими допущеннями, привнесеними в модель теорією кіл, це пояснити не можна. Тривалий час отримані результати не знаходили свого логічного пояснення. Пошук причин такої похибки в теорії і алгоритмі розрахунку ні до чого не привів. Лише після побудови більш детальних моделей, які враховують реальні зубцеві структури статора і ротора, вказана проблема була подолана.

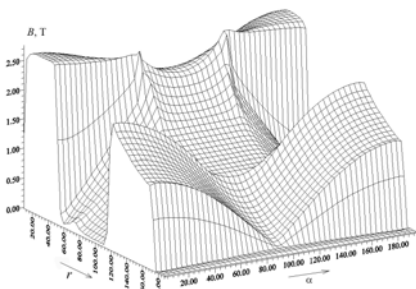


Рис. 2. Просторовий розподіл модуля вектора магнітної індукції в системі координат ротора на полюсному ділянці турбогенератора в момент часу $t = 650$ с пере хідного процесу холостого ходу (лінійна модель)

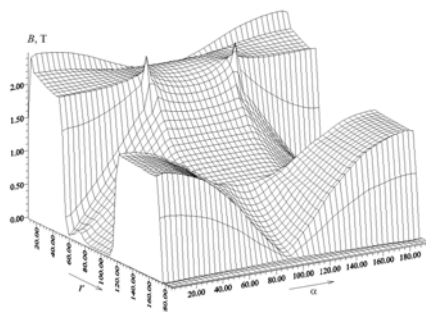


Рис. 3. Просторовий розподіл модуля вектора магнітної індукції в системі координат ротора на полюсному ділянці турбогенератора в момент часу $t = 650$ с пере хідного процесу холостого ходу (нелінійна модель)

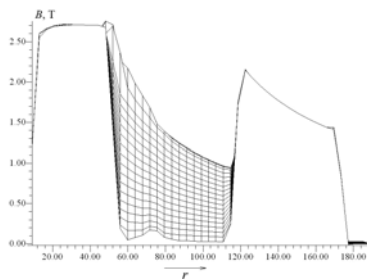


Рис. 4. Розподіл модуля вектора магнітної індукції вздовж радіуса зон поперечного перерізу турбогенератора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу (лінійна модель)

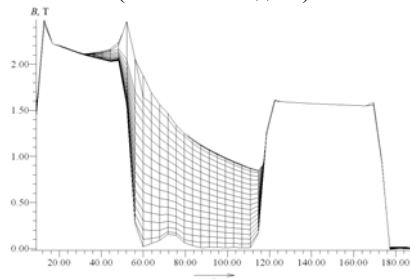


Рис. 5. Розподіл модуля вектора магнітної індукції вздовж радіуса зон поперечного перерізу турбогенератора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу (нелінійна модель)

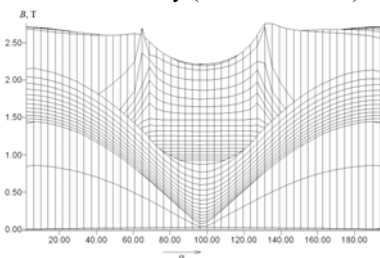


Рис. 6. Розподіл вектора магнітної індукції вздовж кутової координати з точки спостереження назовні статора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу турбогенератора (лінійна модель)

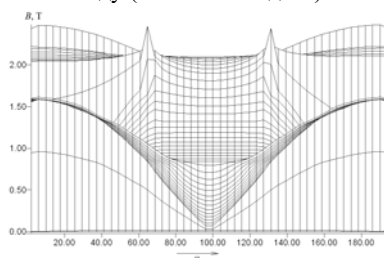


Рис. 7. Розподіл вектора магнітної індукції вздовж кутової координати з точки спостереження назовні статора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу турбогенератора (нелінійна модель)

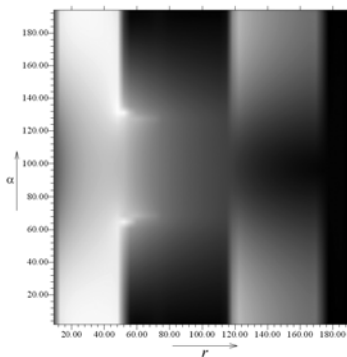


Рис. 8. Еквіпотенціальний просторовий розподіл модуля вектора магнітної індукції в зонах поперечного перерізу турбогенератора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу (лінійна модель)

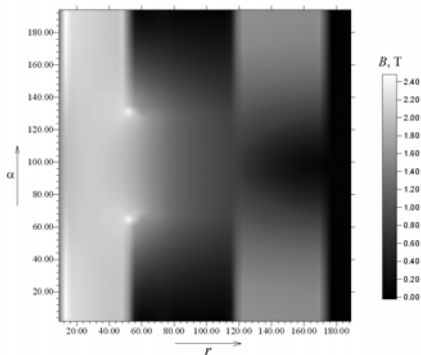


Рис. 9. Еквіпотенціальний просторовий розподіл модуля вектора магнітної індукції в зонах поперечного перерізу турбогенератора у момент часу $t = 650$ с перехідного процесу холостого ходу (нелінійна модель)

Необхідно підкреслити, що виключно польова математична модель турбогенератора, яка найбільш повно враховує реальну структуру пристрою, забезпечує високу точність розрахунку.

У приведеній моделі еквівалентування зубцевих структур статора і ротора приводить до появи такої похибки.

Аналіз отриманих результатів комп'ютерного симулювання режиму холостого ходу за допомогою чотирьох розроблених польових моделей показав,

що у випадку створення магнітного поля в роторі за допомогою обмотки у вигляді суцільного середовища з еквівалентованими характеристиками, ефективність турбогенератора зростає більше ніж на 23%, тобто на величину отриманої похибки приведені вище моделі.

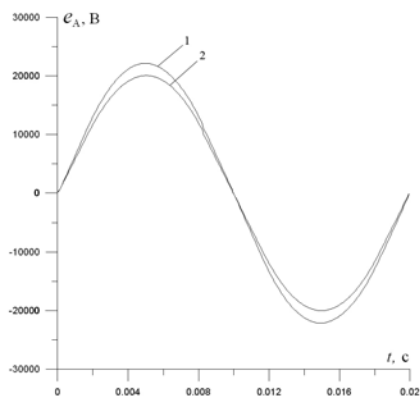


Рис. 10. Часові значення напруги фази А обмотки статора після завершення перехідного процесу в лінійній (1) і нелінійній (2) моделях

Це можна пояснити виходячи з особливостей фізичних процесів. В реальному турбогенераторі частина магнітного потоку обмотки ротора шунтується зубцевою зоною ротора, зменшуючи при цьому робоче поточкозчеплення обмоток статора. В

умовно еквівалентованій обмотці ротора у вигляді суцільного середовища, яка розглядається в приведеній моделі, весь магнітний потік витісняється із зони обмотки, збільшуючи робочий магнітний потік, який проходить через магнітну систему статора. У результаті відбувається збільшення номінальної напруги статора турбогенератора при тих самих значеннях струму збудження.

З практичної точки зору, виготовити ротор, з такою обмоткою, складно, але отримані результати наполегливо свідчать, що якщо б це вдалось, то ефективність турбогенератора значно б зросла.

Іншим складним для реалізації на практиці способом підвищення ефективності турбогенератора є використання при виготовленні пристрою магнітних матеріалів з лінійними характеристиками з мінімальним насиченням.

Комп'ютерне симулювання режиму холостого ходу турбогенератора проводилось для періоду роботи реального пристрою тривалістю понад 850 с. Спостерігалась числова стійкість тривалих комп'ютерних розрахунків, як для випадку лінійної, так і нелінійної моделей. Час розрахунку для лінійної моделі складав біля 1000 год, а нелінійної – понад 1500 ч.

Висновок

Для моделювання різних режимів роботи електротехнічних пристроїв необхідно розробляти окремі математичні моделі для кожного з режимів.

Розрахунок електромагнітних процесів у рухомих і нерухомих середовищах необхідно проводити у відповідних системах координат, щоб виключити появу просторово-часового розриву функцій основних векторів електромагнітного поля в моделі.

Еквівалентування зубцевих структур пристрою суцільними анізотропними середовищами приводить до спотворення аналізу електромагнітних процесів у пристроях.

1. Чабан В. Й., Ковивчак Я. В. Полевая математическая модель турбогенератора в режиме холостого хода. – Электричество, 2003, № 6, с. 32-36.
2. Чабан В. Й., Ковивчак Я. В. Полевая математическая модель турбогенератора в режиме холостого хода в фазных координатах. – Электричество, 2003, № 7, с. 53-57.
3. Ковивчак Я. В. Особенности расчета электромагнитного поля в движущихся средах. – Электричество, 2004, № 1, с. 59-62.
4. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. – М.: Техничко-теоретической литературы. – 1956. – 617 с.
5. Ковивчак Я. В. Определение граничных и краевых условий в пространственных задачах электродинамики. – Электричество, 2009, № 8, с. 66-74.

Поступила 14.03.2011р.