

366 с. 3. Михайлов В.В., Жуков Ю.С., Суд И.И. Энергетика нефтяной и газовой промышленности. – Недра, 1982. – 350 с. 4. Нефтепромысловое оборудование: Справочник / Под ред. Е.И. Бухаленко. – М.: Наука, 1990. – 539 с. 5. Клоков Б.К. Практические методы учета эффекта вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации // Электротехника. – 1970. – № 6. – С. 48–51. 6. Фильц Р.В., Онышко Е.А., Плахтына Е.Г. Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока // Преобразователи частоты для электропривода. – Кишинев: Штиинца. – 1979. – С. 11–22. 7. Stakhiv P., Malyar A. Influence of saturation and skin effect on current harmonic spectrum of asynchronous motor powered by thyristor voltage regulator // Proceedings of the IVth International Workshop Computational Problems of Electrical Engineering. – Gdynia, Poland, 1–3 June 2005. – P. 58–60. 8. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 9. Молчанов Г.В., Молчанов А.Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа. – М.: Недра, 1984. – 464 с. 10. Станки-качалки. – Баку: Машиностроительный завод, 1978. – 28 с.

УДК 621.311.001.57

В.С. Маляр, В.І. Горячко, Т.І. Рижий, М.О. Соколовський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ТЗЕ

РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ РОЗВ’ЯЗУВАННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ

© Маляр В.С., Горячко В.І., Рижий Т.І., Соколовський М.О., 2006

Запропоновано метод і алгоритм розрахунку усталених режимів синхронного турбогенератора на основі розв’язування крайової задачі диференціальним сплайн-методом. Метод дає змогу отримати залежності координат режиму від часу з урахуванням насичення магнітопроводу та реального розподілу намагнічувальних сил контурів статора без розрахунку перехідного процесу. Матриця диференціальних індуктивностей обчислюється на основі розрахунку заступної схеми магнітопроводу генератора.

In the paper method and algorithm to calculate steady-state modes of synchronous turbogenerator. Solving of boundary problem using differential spline-method are the basis of proposed method. Proposed method makes it possible to obtain mode coordinates time dependences when magnetic core saturation and real distribution of magnetizing forces of stator circuits are taken into account without transient processes analysis. Matrix of differential inductances is calculated on the basis of generator magnetic core equivalent circuit analysis.

Постановка проблеми. Переважну частину електроенергії в Україні виробляють за допомогою синхронних турбогенераторів (СТГ), тому надійність електропостачання, загалом, значною мірою залежить від надійної їх роботи. СТГ мають, як правило, великі потужності, і вихід їх з ладу може призвести не тільки до значного недовиробітку електричної енергії, але й суттєво вплинути на роботу інших генераторів. Все це висуває високі вимоги до їх проектування, а також вимагає дослідження поведінки в різних експлуатаційних режимах роботи. До цього потрібно додати, що натурні експерименти над СТГ з метою перевірки їх робочих властивостей не тільки надто дорогі, але здебільшого їх неможливо здійснити взагалі. Тут найефективніший метод дослідження – це

математичне моделювання та комп'ютерне симулювання. Воно єдино можливе на стадії проектування як СТГ, так і електроенергетичних систем та систем керування.

Аналіз останніх досліджень. Відомі в технічній літературі методи розрахунку мають в своїй основі здебільшого різного роду заступні схеми СТГ [1, 2], а насичення враховується введенням коефіцієнтів, способів обчислення яких є безліч. Такий підхід використовується в класичних методиках з проектування електричних машин [3]. Він дає змогу з достатньо високою точністю розрахувати номінальний режим роботи. Щодо динамічних та аномальних режимів СТГ, то тут високу адекватність результатів математичних експериментів можна досягнути лише на підставі використання достатньо складних моделей генератора. У той же час розроблені польові моделі [4, 5] можна застосовувати лише для розв'язування окремих часткових задач, а також для визначення параметрів, які використовують під час складання заступних схем. Складність польових моделей не дає можливості застосовувати їх для проектування. Проміжне положення щодо складності та точності займає розроблена в [6] математична модель СТГ, яка дає змогу розрахувати магнітне поле машини на підставі використання розгалуженої заступної схеми магнітопроводу. Масивний ротор при цьому в електричному відношенні еквівалентується двома взаємно ортогональними контурами, параметри яких вибираються згідно з рекомендаціями [5], отриманими на підставі розв'язування польової задачі методом скінченних елементів.

Будь-який стаціонарний режим СТГ можна розрахувати методом усталення, розв'язавши задачу Коші для системи диференціальних рівнянь (ДР), складених на підставі прийнятих допущень, на достатньо великому проміжку часу. Однак такий спосіб розв'язування задачі неефективний з багатьох міркувань. Ефективнішим є запропонований в [7] метод пошуку таких початкових умов, які дають змогу отримати періодичні залежності координат режиму від часу, числовим інтегруванням вихідної системи ДР в межах одного періоду. Однак, як відомо [8], в методах цього напрямку основною проблемою є збіжність ітераційного процесу. Ця проблема особливо актуальна для електромеханічних процесів з причини наявності рівняння руху ротора, до якого входить добуток координат режиму. У статті пропонується інший підхід до вирішення проблеми, який передбачає розв'язування крайової задачі для системи ДР на основі апроксимації змінних стану кубічними сплайнами [9].

Задачі дослідження. Метою статті є розроблення методу розрахунку залежностей струмів та потокозчеплень контурів СТГ від часу в різноманітних усталених режимах роботи як симетричних, так і несиметричних, а також й в усталених коротких замиканнях з урахуванням насичення магнітопроводу та реального розподілу намагнічувальних сил обмоток статора, який був би придатний для виконання оптимізаційних розрахунків.

Виклад основного матеріалу. Отримати залежності координат режиму від часу на періоді повторюваності процесу, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу, можна розв'язуванням крайової задачі, а одним із ефективних методів її розв'язування є диференціальний сплайн-метод [9]. Стосовно цієї задачі суть його полягає ось у чому.

Запишемо рівняння електромагнітної рівноваги контурів статора та еквівалентних контурів ротора СТГ у векторній формі

$$\frac{d\vec{\Psi}}{dt} = \vec{u} - R\vec{i}, \quad (1)$$

де $\vec{\Psi} = (\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f, \Psi_d, \Psi_q)^T$, $\vec{i} = (i_A, i_B, i_C, i_f, i_d, i_q)^T$, $\vec{u} = (u_A, u_B, u_C, u_f, 0, 0)^T$, – вектори потокозчеплень, струмів та напруг контурів (індекс "T" означає транспонування); u_f – напруга обмотки збудження; u_A, u_B, u_C – фазні напруги мережі, якщо генератор працює паралельно з мережею, або спади напруг на навантаженні – у разі автономної роботи; $R = \text{diag} (R_A, R_B, R_C, R_f, R_d, R_q)$ – діагональна матриця активних опорів контурів.

Внаслідок насичення магнітопроводу СТГ потокозчеплення кожного контуру є нелінійною функцією вектора $\vec{i}$ струмів і кута γ повороту ротора, тобто

$$\frac{d\vec{\Psi}}{dt} = \frac{\partial\vec{\Psi}}{\partial\vec{I}} \frac{d\vec{I}}{dt} + \frac{\partial\vec{\Psi}}{\partial\gamma} \frac{d\gamma}{dt}, \quad (2)$$

де $L = \partial\vec{\Psi} / \partial\vec{I}$ матриця диференціальних індуктивностей контурів СТГ, а $\partial\vec{\Psi} / \partial\gamma$ – вектор коефіцієнтів ЕРС обертання ротора.

В усталеному режимі компоненти векторів $\vec{\Psi}, \vec{I}, \vec{U}$ є періодичними функціями

$$\vec{\Psi}(t) = \vec{\Psi}(t+T); \vec{I}(t) = \vec{I}(t+T); \vec{U}(t) = \vec{U}(t+T), \quad (3)$$

де $T = 2\pi/\omega$ – період, який визначається швидкістю обертання ротора ω та кількістю пар полюсів p .

Апроксимуючи компоненти векторів (3) на сітці $N+1$ вузлів, віддалі між якими можуть бути нерівномірними, з урахуванням періодичних крайових умов (3), систему ДР (1) неперервного аргументу t замінимо її дискретним аналогом. У результаті отримаємо систему скінченних рівнянь

$$H_c \vec{\Psi}_c - \vec{F}_c = 0, \quad (4)$$

де $H_c = \text{diag}(H, \dots, H)$ – блоково-діагональна матриця, яка складається з N однакових блоків-матриць H (елементи матриці H визначаються сіткою вузлів періоду [3]); $\vec{\Psi}_c = (\vec{\Psi}_1, \dots, \vec{\Psi}_N)$ – вектор, який своєю чергою складається з N векторів $\vec{\Psi}_j$ значень потокозчеплень у вузлах періоду; $\vec{F}_c = (\vec{F}_1, \dots, \vec{F}_N)$ – вектор, який своєю чергою складається з N векторів $\vec{F}_j$ – значень векторів-функцій у вузлах, які є правими частинами системи ДР (1).

Отримана внаслідок алгебризації ДР система скінченних рівнянь (4) нелінійна. Її розв'язком є сітковий вектор $\vec{I}_c$, компоненти якого – це вузлові значення струмів контурів.

Застосування ітераційних методів до розв'язування нелінійної системи (4), зокрема методом Ньютона, ускладнюється проблемою збіжності, що в остаточному підсумку зводиться до проблеми отримання початкового наближення вектора $\vec{I}_c$. Надійним способом його отримання є диференціальний метод [10], згідно з яким в систему скінченних рівнянь (5) вводиться скалярний параметр ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) за допомогою множення вектора $\vec{U}_c$ на ε . У результаті отримаємо систему ДР аргументу ε , яка після диференціювання по цьому параметру має вигляд

$$W_c \frac{d\vec{I}_c}{d\varepsilon} = \vec{U}_c, \quad (5)$$

де $W_c = \left(H_c \frac{\partial\vec{\Psi}_c}{\partial\vec{I}_c} - \frac{\partial\vec{F}_c}{\partial\vec{I}_c} \right) \frac{d\vec{I}_c}{d\varepsilon}$ – матриця Якобі системи (5), в якій $L_c = \partial\vec{\Psi}_c / \partial\vec{I}_c$ – матриця диференціальних індуктивностей, яка є блоково-діагональною. Це пояснюється тим, що потокозчеплення кожного контуру в j -му вузлі визначається значенням вектора $\vec{I}_j$ струмів в цьому ж вузлі і не залежить від його значень в інших вузлах.

Для отримання розв'язку систему (5) необхідно проінтегрувати числовим методом в межах від $\varepsilon = 0$ до $\varepsilon = 1$, причому на кожному кроці розв'язок доцільно уточнювати методом Ньютона, що не вимагає суттєвих затрат обсягу обчислень, оскільки матриця Якобі в обох цих методах однакова за своїм змістом та структурою.

Матриці L_j диференціальних індуктивностей контурів СТГ обчислюють на підставі розрахунку його магнітного кола відповідно до викладеного в [5]. При цьому магнітопровід розбивається на елементарні об'єми, в межах яких поле можна вважати однорідним, що дає змогу подати їх зосередженими магнітними опорами з відповідними характеристиками намагнічування. Такий підхід до розрахунку магнітного поля в повітряному проміжку генератора забезпечує високу точність при значно меншому обсязі обчислень порівняно з методами теорії електромагнітного поля. Отже, для визначення електромагнітних параметрів СТГ необхідно для кожної сукупності значень струмів $\vec{I}_j$ контурів розрахувати його магнітний стан, що зводиться до розв'язування нелінійної системи рівнянь магнітної рівноваги складного магнітного кола, яка має досить високий

порядок. Зауважимо, що під час розв'язування задачі методом усталення необхідно цю систему розв'язувати на кожному кроці числового інтегрування ДР. У запропонованому методі магнітний стан СТГ розраховується для кожного j -го вузла періоду на кожному кроці інтегрування системи ДР (5) по аргументу ε , тобто в позачасовій області, що в десятки разів скорочує обсяг обчислень порівняно з розв'язуванням задачі в часовій області. Це пояснюється ще й тим, що в поставленій задачі розрахунку усталеного режиму СТГ кількість рівнянь електричної рівноваги дорівнює шести, а рівнянь магнітної рівноваги – десяти, тобто основна частина обчислень зумовлена необхідністю розв'язувати нелінійну систему рівнянь високого порядку на кожному кроці інтегрування.

Багатовимірна залежність

$$\vec{I}_c = \vec{I}_c(\varepsilon) \quad (6)$$

відповідає зміні вузлових значень струмів контурів від нарощування параметра ε , сіткового вектора $\vec{U}_c$ прикладених напруг. Ці залежності є плавними і інтегрування системи ДР (5) можна здійснити методом Ейлера за 5–10 кроків. Отже, зменшення в десятки разів кількості необхідних для досягнення поставленої задачі розрахунку усталеного періодичного режиму кроків інтегрування істотно скорочує обсяг обчислень.

Отримане внаслідок інтегрування по ε значення вектора $\vec{I}_c$ є досить близьким до розв'язку системи (4), тому воно знаходиться в околі збіжності ітераційного методу Ньютона, згідно з яким уточнене $(k+1)$ -е наближення вектора $\vec{I}_c$ отримуємо за формулами

$$\begin{aligned} \vec{I}_c^{(k+1)} &= \vec{I}_c^{(k)} - \Delta \vec{I}_c^{(k)}; \\ W \Delta \vec{I}_c^{(k)} &= \vec{Q}(\vec{I}_c^{(k)}), \end{aligned}$$

де $\vec{Q}(\vec{I}_c^{(k)})$ – вектор нев'язок системи (4) при $\vec{I}_c = \vec{I}_c^{(k)}$.

Внаслідок розв'язування системи (5) диференціальним методом і ітераційного уточнення методом Ньютона отримуємо сітковий вектор $\vec{I}_c$ струмів, що дає змогу обчислити відповідні потокозчеплення й побудувати сплайн-апроксимації цих кривих, а також обчислити значення електромагнітного моменту. Розв'язавши крайову задачу при заданій напрузі, можна аналогічно досліджувати вплив будь-якого параметра, прийнявши отримані результати за початкові умови для наступного етапу розрахунку. При цьому замість параметра ε необхідно взяти той параметр, вплив якого досліджується, а це дає змогу будувати ефективні оптимізаційні алгоритми.

Висновки. Запропонований метод числового аналізу дає змогу отримати залежності координат усталеного режиму роботи синхронного турбогенератора від часу з урахуванням насичення магнітопроводу, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу. Задача розв'язується в позачасовій області, як крайова для системи ДР першого порядку з періодичними крайовими умовами, на основі апроксимації змінних стану кубічними сплайнами. При цьому обмотка статора зображена в фізичних координатах, а масив ротора еквівалентується двома взаємно перпендикулярними обмотками. Такий підхід дає змогу розраховувати не тільки симетричні режими, але й несиметричні, зокрема й різного роду короткі замикання. Матриця диференціальних індуктивностей обчислюється на основі розрахунку магнітного поля в повітряному проміжку генератора з використанням розгалуженої планарної заступної схеми магнітопроводу.

1. До Нгуен Хинг. *Моделирование динамических процессов асинхронизованных турбогенераторов, що працюють разом із синхронними: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ін-т електродинаміки.* – К., 1998. – 17 с. 2. Сивокобыленко В.Ф., Ерхов А.Г. *Экспериментальное определение параметров схем замещения синхронных машин // Изв. вузов. Электромеханика.* – 1991. – № 1. – С. 42–45. 3. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. *Основы проектирования электрических машин переменного тока.* – Л.: Энергия, 1974. – 504 с. 4. Зозулин Ю.В. *Математическая модель асинхронизированного турбогенератора: Преп. / АН УССР, Ин-т электродинамички.* – К., 1991. – № 691. – 36 с. 5. *Опре-*

деление параметров электрической машины с массивным ротором на основе расчетов поля методом конечных элементов / В.Н. Асанбаев, Ю.А. Шумилов, Е.В. Струневич, В.А. Саратов. Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики. – К.: 1984. – 358.– 53 с. 6. Горячко В., Коцюба М., Рижий Т. Визначення диференційних електромагнетних параметрів у математичних моделях неявнополюсних машин з єдиним магнетним потоком // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 511. – С. 19–22. 7. Чабан В.И. Ускоренный поиск вынужденных периодических режимов в цепях с магнитопроводами // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 69–70. 8. Синицкий Л.Я., Хвищун И.А., Шмигельский Я.А. О надежном алгоритме поиска периодического режима в нелинейных цепях // Теоретическая электротехника. – 1981. – Вып. 30. – С. 114–125. 9. Маляр В.С. Основные положения сплайн-метода расчета периодических режимов работы электрических цепей // Электроника и связь. – 1998. – Вып. 5. – С. 11–14. 10. Яковлев М.Н. К решению систем нелинейных уравнений методом дифференцирования по параметру // ЖВМ и МФ. Т. 4. – 1964. – № 1. – С. 146–149.

УДК 62-83

Я.Ю. Марущак, А.П. Кушнір

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ ДВОМАСОВОЇ ПОЗИЦІЙНОЇ СМР ПЕРЕМІЩЕННЯМ ЕЛЕКТРОДІВ З УРАХУВАННЯМ НУЛІВ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

© Марущак Я.Ю., Кушнір А.П., 2006

Запропоновано методику синтезу спостерігачів з усуненням нулів передавальної функції модифікованим кореневим методом. Досліджено характеристики системи модального регулювання переміщенням електродів з таким спостерігачем. Результати дослідження показали, що цей спостерігач дає змогу покращити характеристики системи модального регулювання переміщенням електродів і, отже, зменшити дисперсію потужності дуг.

The method of synthesis of observers with zero eliminate of transfer function by the modified root method is proposed. The performances of the modal control system for electrodes motion with such observer are researched. This observer allows to improve performances of the modal control systems for electrodes motion and, thus, decrease of dispersion of arc power.

Постановка проблеми. Основні техніко-економічні показники дугової сталеплавильної печі (ДСП) значною мірою залежать від роботи системи автоматичного керування (САК) переміщенням електродів. Її основним завданням є стабілізація довжини дуги на заданому рівні. Довжина дуги визначає її потужність при певних характеристиках системи живлення. Змінюючи довжину дуги, здійснюється керування потужністю, яка вводиться в пічний простір і плавить метал.

Основним завданням синтезу САК переміщенням електродів є збільшення швидкодії в поєднанні із аперіодичним перехідним процесом переміщення електрода. Це дасть змогу не тільки рівномірно вводити задану потужність у піч, але й швидше відновлювати нормальний режим роботи печі при виникненні технологічних к.з., обривів дуг, а також зменшити час аварійних простоїв печі через поломки електродів, коли під час запалювання дуги електроди доторкнуться до шихти з недопустимими зусиллями.