

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ СУКУПНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ АПЕРІОДИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В.В. Твердяков, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто алгоритм і розроблено програму визначення електромагнітних параметрів потужних синхронних генераторів, здійснено розрахунки їх параметрів за експериментальними аперіодичними характеристиками. Бібл. 6, табл. 6.

Ключові слова: синхронний генератор, параметри, експеримент, алгоритм, аперіодичні характеристики.

Розрахунки режимів електроенергетичних систем вимагають для математичних моделей їх елементів, які використовуються, знання параметрів, що яким-небудь еквівалентним чином враховують складний характер процесів, котрі в них протікають (особливо у потужних синхронних генераторах).

Існує низка методів експериментального визначення сукупності параметрів синхронних генераторів, до числа яких входять так звані класичні методи [2]. У багатьох випадках обчислені за їх допомогою параметри надають достатнього уявлення про поведінку машини в перехідних режимах, хоча і не можуть дати повну характеристику її роботи через їх певну обмеженість, а також точність зняття відповідних аперіодичних характеристик. Разом з наявними обмеженнями на досягну точність вимірювань, одержаних під час експерименту по зняттю аперіодичних характеристик, результати цих вимірювань обтяжені різними систематичними і випадковими помилками. Проте їх можна зменшити шляхом використання дорогої апаратури, ретельного планування експериментальних досліджень і застосування методів математичної обробки результатів, що забезпечують оптимальну або квазіоптимальну фільтрацію помилок вимірювань. Існуюча на цей час точність вимірювань при визначенні параметрів потужних синхронних генераторів ніколи не перевищувала 0,5 % і збільшення її, як показано далі, навряд чи доцільне.

Як правило, для більшості задач аналізу режимів енергосистеми приймається модель синхронного генератора, що містить один демпферний контур по поздовжній осі. Проте ряд задач, пов'язаних з розрахунком системної автоматики або розрахунком тривалих перехідних процесів, потребує моделей більш високого порядку. Відсутність таких моделей генераторів пояснюється як відсутністю надійних методик експериментального визначення їх параметрів, так і програм розрахунку, що враховують подібні моделі. З іншого боку, чим складніша модель, тим вона чутливіша до неточностей початкових даних. Тому на цей час надійна оцінка сукупності електромагнітних параметрів крупних синхронних генераторів, що використовуються в енергосистемах, може бути отримана тільки в результаті спеціально організованих натурних експериментів із застосуванням методик обробки їх результатів, що здійснюють надійну фільтрацію початкових систематичних і випадкових похибок вимірювань.

Подібні програми, а також методики проведення відповідних натурних експериментів для визначення параметрів синхронних машин створювалися в 70-ті роки в Інституті електродинаміки НАН України та в інших організаціях на основі існуючої на той час обчислювальної та експериментальної бази [2, 3]. Останнє зумовлювало спрощення алгоритмів прийнятого для оптимізації математичного методу і алгоритмів оптимізації величини параметра регуляризації, а також обмеження порядку n вибраної моделі генератора, відбраковування у процесі розрахунків вимірювань, що не вкладаються у допустимий інтервал помилок, і зниження кількості точок характеристик, що знімаються.

У статті визначаються шляхи вдосконалення запропонованих раніше методик [4, 5] і програм розрахунку параметрів потужних синхронних генераторів за експериментальними аперіодичними характеристиками з використанням сучасних персональних комп'ютерів.

Удосконалення комплексу програм обробки аперіодичних характеристик синхронних генераторів і методики розрахунку по ній сукупності електромагнітних параметрів. Як згадувалося, розрахунки аварійних режимів вимагають знання параметрів математичних моделей елементів енергосистеми, котрі яким-небудь еквівалентним чином враховують складний характер процесів, що в них відбуваються (особливо в генераторах). При цьому кількість таких параметрів обмежена. Разом з параметрами режиму (потужність, напруга, струм статора і ротора) до числа параметрів моделей входять параметри класичної еквівалентної схеми заміщення, що містить у загальному випадку крім кола збудження по декілька демпферних контурів по поздовжній і поперечній осях. Тоді динамічні властивості електричної машини визначаються трьома операторними функціями: $X_d(p)$, $X_q(p)$ і $G(p)$. Розрахункові оцінки параметрів їх через вплив масиву бочки ротора, кінцевих ефектів, втрат у пазах і лобовій частині потужних синхронних генераторів тощо мало надійні і вимагають експериментальної перевірки.

Задача визначення параметрів математичної моделі об'єкта за його експериментально вимірною функцією $f(t)$ є некоректною, тобто малі неминучі похибки у вимірюваннях $f(t)$ є причиною помітних варіацій величин параметрів шуканої моделі $X_d(p)$. Проблема оптимального згладжування (фільтрації) аперіодичного сигналу в загальному вигляді не вирішена. Проте у роботі [1] показано, що для такого класу задач квазіоптимальним фільтром є фільтр Чебишева-Пуассона. Сигнали на виході цього фільтра k -го порядку при вхідному сигналі визначаються формулою

$$P_k = \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} t^k f(t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

де α – параметр згладжування (моменти Чебишева-Пуассона).

Моменти Чебишева-Пуассона мають просте фізичне значення, яке безпосередньо витікає з визначення перетворення Лапласа:

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt. \quad (2)$$

Якщо у рівнянні (2) функцію e^{-pt} розкласти в ряд Тейлора-Маклорена в точці $p^* = p + \alpha$, можна отримати

$$F(p) = \sum_{k=0}^{\infty} P^{*k} \frac{(-\tau)^k}{(k!)} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} t^k f(t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} (-\tau)^k P_k (p + \alpha)^k. \quad (3)$$

Отже, моменти Чебишева-Пуассона, по суті, похідні перетворення Лапласа імпульсної функції $f(t)$ у точці $p = \alpha$ відрізняються від них за величиною тільки множителем $(-\tau)^k = (-1/\alpha)^k$.

При чисельній реалізації фільтра Чебишева-Пуассона у цій роботі використано метод попереднього аналітичного інтегрування рівняння (1) у припущенні, що функцію $f(t)$ на кроці інтегрування може бути замінено параболою

$$f(t) = a + bt + ct^2. \quad (4)$$

У цьому випадку обчислення моментів P_k може бути виконано за рекурентними формулами.

Для знаходження незміщених оцінок величин моментів Чебишева-Пуассона функція $f(t)$ має бути визначена на деякій послідовності моментів часу в області її існування, де

$T \geq 4\tau'_d$ (τ'_d – постійна часу генератора). У цьому випадку, якщо кількість точок визначен-

ня $f(t)$ більша $16n$ (n – порядок знаменника операторної функції $X_d(p)$), похибка обчислення моментів Чебишева-Пуассона визначається за формулою [3]

$$\varepsilon_k \leq 2(k+1)M_3 \operatorname{ch}(\alpha h), \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

де M_3 – максимальне значення третьої кінцевої різниці функції $f(t)$ для половини інтервалу h зміни $f(t)$, яке за визначенням не може бути меншим за потрійну середньоквадратичну похибку обмірів $f(t)$.

З викладеного витікає, що для коректного визначення параметрів синхронного генератора необхідно виконувати вказані рекомендації.

При проведенні дослідів раптового короткого замикання або відновлення напруги реєструється не імпульсна реакція $f(t)$, а перехідна функція $h(t)$, що є реакцією генератора на східчасте збурення. Оскільки імпульсна функція $f(t)$ є похідною від $h(t)$, то шукані моменти Чебишева-Пуассона P_k імпульсної функції $f(t)$ однозначно визначаються моментами Чебишева-Пуассона перехідної функції $h(t)$ – H_k :

$$P_0 = h(\infty) - \alpha H_0, \dots; \quad P_k = \alpha(H_{k-1} - H_k), \quad (6)$$

де $h(\infty)$ – стале значення перехідної функції $h(t)$.

По заданій послідовності моментів Чебишева-Пуассона, враховуючи (6), можна отримати алгоритм визначення шуканих параметрів операторної функції генератора по поздовжній осі $X_d(p)$.

Нехай $Z(p) = \frac{a_0}{1+b_1 p}$, тоді, замінюючи $p = p^* + \alpha$, маємо

$$Z(p^*) = \frac{a_0}{1+b_1(p^* + \alpha)} = \frac{a_0}{1+i_1 \alpha + p^* b_1} = p_0 - \tau_p p_1 + \tau^2 p^2 p_2 - \dots \quad (7)$$

Помноживши праву частину рівності (7) на знаменник лівої і прирівнявши члени з однаковими показниками оператора p , отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 = p_0(1+b_1 \alpha); \\ 0 = p_0 b_1 - \tau p_1(1+b_1 \alpha). \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язком системи є

$$a_0 = \frac{p_0^2}{p_0 - p_1}; \quad b_1 = \frac{\tau p_1}{p_0 - p_1}. \quad (9)$$

Аналогічно, якщо $n = 2$,

$$\begin{aligned} b_1 &= \tau(D_1 - 2D_0)/D_1; & b_2 &= \tau^2 D_0/D; \\ a_1 &= \tau(p_0 D_1 - p_1 D_2)/D; & a_0 &= (p_0(D_2 - D_1) + p_1 D_2)/D, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{де } D_0 = \begin{vmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} p_0 & p_2 \\ p_1 & p_3 \end{vmatrix}; \quad D_2 = \begin{vmatrix} p_0 & p_1 \\ p_1 & p_2 \end{vmatrix};$$

$$D = D_0 - D_1 + D_2. \quad (11)$$

Якщо $n = 3$, тоді

$$\begin{aligned} b_1 &= \tau(D_2 - 2D_1 + 3D_0)/D, & b_2 &= \tau^2(D_1 - 3D_0)/D, & b_3 &= \tau^3 D_0/D; \\ a_0 &= (p_0(D_3 - D_2 + D_1) + p_1(D_3 - D_2) + p_2 D_3)/D; \\ a_1 &= \tau(p_0(D_2 - 2D_1) + p_1(D_3 - 2D_2) - 2p_2 D_3)/D; \\ a_2 &= \tau^2(p_0 D_1 - p_1 D_2 + p_2 D_3)/D, \end{aligned}$$

де

$$D_0 = \begin{vmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_2 & p_3 & p_4 \\ p_3 & p_4 & p_5 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} p_0 & p_2 & p_3 \\ p_1 & p_3 & p_4 \\ p_2 & p_4 & p_5 \end{vmatrix};$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} p_0 & p_1 & p_3 \\ p_1 & p_2 & p_4 \\ p_2 & p_3 & p_5 \end{vmatrix}; \quad D_3 = \begin{vmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_1 & p_2 & p_3 \\ p_2 & p_3 & p_4 \end{vmatrix};$$

$$D = D_3 - D_2 + D_1 - D_0.$$

Для того щоб зменшити методичні помилки у визначенні величин шуканих параметрів, необхідно враховувати особливості фізичних процесів у потужних синхронних генераторах при проведенні дослідів раптового короткого замикання і відновлення напруги, а також особливості методики подальшої обробки вимірювань.

Перехідна функція $i(t)$ у досліді короткого замикання є для двоконтурної схеми заміщення оригіналом операторної функції

$$I(p) = \frac{U_\infty}{pX_d(p)} = \frac{u_\infty}{px_d} \cdot \frac{(1 + p\tau'_{d0})(1 + p\tau''_{d0})}{(1 + p\tau'_{d0})(1 + p\tau''_{d0})} \quad (12)$$

і складається з аперіодичної $i_0(t)$ і періодичних складових синхронної $i_1(t)$ та подвійної частоти $i_2(t)$: $i(t) = i_0(t) + i_1(t) + i_2(t)$.

Масив чисел обміру огинаючої перехідної функції струму короткого замикання $i(t)$ можна розкласти на огинаючу складову синхронної частоти $i_1(t)$ і сумарну огинаючу складову аперіодичної і подвійної частот:

$$i_0(t) + \overline{i_2(t)} = 0,5 \frac{u_{q0}}{x''_d} \cos \delta_0 e^{-\alpha_d t}; \quad (13)$$

$$\overline{i_1(t)} = u_{q0} \left\{ \frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau''_d}} \times \cos \delta_0 + \frac{1}{\omega \tau''_q} \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x'_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau''_q}} \sin \delta_0 \right\}. \quad (14)$$

Перехідна функція $u(t)$ у досліді відновлення напруги є для двоконтурної схеми заміщення оригіналом операторної функції

$$U(p) = I_\infty \frac{X_d(p)}{p} = I_\infty \frac{x_d}{p} \cdot \frac{(1 + p\tau'_d)(1 + p\tau''_d)}{(1 + p\tau'_{d0})(1 + p\tau''_{d0})} \quad (15)$$

і на відміну від перехідної функції $i(t)$ має тільки складову синхронної частоти:

$$\overline{U(t)} = I_\infty \left\{ x_d + (x'_d - x_d) e^{-t/\tau'_{d0}} + (x''_d - x'_d) e^{-t/\tau''_{d0}} \right\} - r \left(1 - \frac{x'_q}{x_q} \right) e^{-t/\tau'_{q0}}. \quad (16)$$

Рівняння (13)...(16) визначають основні співвідношення між шуканою сукупністю параметрів генератора і перехідною функцією струму раптового симетричного короткого замикання або відновлення напруги.

Як критерій оптимальності вирішення цієї задачі приймається умова мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації σ , заданої результатами обміру огинаючої перехідної функції. У протилежному випадку на результати визначення сукупності параметрів синхронного генератора накладаються перешкоди від випадкових і систематичних помилок.

Зі збільшенням порядку передаточної функції $X_d(p)$, як правило, величина σ зменшується. Мінімально необхідний порядок n вибирається з умови відповідності величини середньоквадратичної похибки початкових даних.

Точність апроксимації вимірюваної перехідної характеристики і, отже, надійність визначення коефіцієнтів $X_d(p)$ істотно залежать від вибору величини вагового множника $\alpha = 1/\tau$.

Отримати будь-які теоретичні оцінки оптимальної величини α не можливо. Тому в розробленому програмному комплексі, призначеному для визначення сукупності параметрів синхронних генераторів з дослідів раптового короткого замикання або відновлення напруги, передбачається підпрограма пошуку оптимальної величини. Оскільки залежність похибки апроксимації від величини α багатофункціональна, то спочатку здійснюється огляд перехідної функції на інтервалі $[0, 1 - 2]$ с, а потім в області якнайменшого мінімуму визначається оптимальна величина α методом найшвидшого спуску.

На основі викладеного розроблено програмний комплекс, який складається з окремих підпрограм, що організовані за єдиним принципом і забезпечують розв'язування таких задач:

- визначення перехідних параметрів потужних синхронних генераторів за експериментальними характеристиками раптового короткого замикання або відновлення напруги;
- розрахунку параметрів еквівалентної класичної схеми заміщення з 1...3 контурами у поздовжній осі;
- визначення і побудови розрахункових характеристик раптового короткого замикання і відновлення напруги синхронного генератора за експериментальними характеристиками і відомими з інших джерел параметрами цього генератора;
- проведення порівняльного аналізу експериментальних, скоригованих і розрахункових характеристик (а також перехідних та інших параметрів) досліджуваного генератора (генераторів).

Керування комплексом здійснюється за допомогою багаторівневих меню за допомогою стандартної клавіатури і маніпулятора «миші». Вхідною інформацією служать експериментальні і розрахункові характеристики, що задаються у відносних або іменованих одиницях, а також параметри досліджуваного генератора для здійснення порівняльного аналізу.

У розроблений програмний комплекс входять такі підпрограми.

Підпрограма введення початкової інформації забезпечує переведення даних до однієї системи одиниць і здійснює їх первинне відбраковування та коригування. Як критерій відбраковування приймається відхилення виділеної точки аперіодичної характеристики на 3σ від похибки початкової інформації σ . Крім того, здійснюється лінійна або сплайнова екстраполяція крайніх точок експериментальних характеристик за 3...7 вимірами, оскільки в експерименті вони можуть не зніматися, а братися з інших джерел. Звичайно, що проведення коригування і відбраковування здійснюється за необхідності.

Підпрограма обчислення коефіцієнтів Чебишева-Пуассона виконує згладжування початкових даних.

Підпрограма обчислення коефіцієнтів a_k і b_k обчислює початкові значення цих коефіцієнтів для $n=(1-3)$; формує початкові значення параметра регуляризації; визначає середньоквадратичні σ_a і максимальні похибки апроксимації; коригує і (або) виключає вимірювання, похибки яких перевищують потрібну середньоквадратичну похибку апроксимації; обчислює значення a_k і b_k для $n=(1-3)$ при різних значеннях регуляризації, отриманих з підпрограми розрахунку цього параметра.

Підпрограма розрахунку параметра регуляризації визначає оптимальні значення параметра регуляризації розв'язку $\alpha=1/\tau$ для $n=(1-3)$. Спочатку здійснюється перегляд експериментальних характеристик для послідовного ряду значень параметра регуляризації і порядку n вибраної моделі. Потім в областях мінімумів визначаються оптимальні величини α за допомогою середньоквадратичних σ_a і максимальних похибок апроксимації.

Підпрограма розрахунку сукупності параметрів генератора визначає перехідні параметри досліджуваного синхронного генератора для експериментально знятих і скоригованих аперіодичних характеристик; обчислює параметри класичної схеми заміщення з одним (двома) демпферними контурами у поздовжній і з одним (двома, трьома) демпферними контурами у поперечній осях при наявності додаткових даних; обчислює параметри схеми заміщення синхронного генератора з $(x_{f1d} - x_{ad}) \neq 0$ у випадках з одним (двома) демпферними контурами у поздовжній і з одним (двома, трьома) демпферними контурами в поперечній осях.

Вихідною інформацією є розрахункові та скориговані аперіодичні характеристики досліджуваного генератора, перехідні параметри і параметри його схем заміщення, середньо-квадратичні похибки апроксимації і максимальні похибки вимірювань заданих експериментальних характеристик.

Для проведення чисельних експериментів та відлагодження описаний вище програмний комплекс був доповнений наступними допоміжними підпрограмами:

1. Підпрограма розрахунку аперіодичних характеристик або за відомими параметрами синхронних генераторів, або за параметрами узагальненого генератора. Вона використовувалася для апробації розробленої в програмі й для дослідження стійкості її роботи при різних систематичних і випадкових похибках. В основу алгоритму цієї програми покладено дробово-раціональну функцію

$$X(p) = x \prod_1^n \frac{(1 + pT^{(n)})}{(1 + pT_0^{(n)})}$$

2. Підпрограма розрахунку параметрів для класичної схеми заміщення синхронного генератора і схеми заміщення з $(x_{f1d} - x_{ad}) \neq 0$ з числом контурів до п'яти по поздовжній і поперечній осях.

3. Підпрограма розрахунку параметрів демпферних контурів синхронного генератора у припущенні, що при розрахунку кожного подальшого контура (у процесі збільшення числа контурів схеми заміщення) параметри попередніх залишаються незмінними. Підпрограми необхідні для аналізу отриманих результатів.

4. Підпрограма розрахунку частотної характеристики $G(j\omega)$ двоконтурних схем заміщення синхронного генератора у поздовжній осі для порівняльного аналізу з результатами, отриманими за програмами обробки експериментальних частотних характеристик:

$$G(j\omega) = \frac{x_{ad}}{r_f} \frac{1 + \omega T_{\sigma 1d}}{(1 + \omega T'_{d0})(1 + \omega T''_{d0})},$$

де x_{ad} – реактивність взаємоіндукції по поздовжній осі; r_f – активний опір обмотки збудження; T'_{d0}, T''_{d0} – перехідна та надперехідна постійні часу по поздовжній осі при розімкненому статорі; $T_{\sigma 1d} = x_{\sigma 1d} / r_{1d}$.

Внаслідок конструктивних особливостей потужних електричних машин $T_{\sigma 1d} \neq T''_{d0}$ і частотна характеристика $G(j\omega)$ практично відповідає аперіодичній ланці першого порядку:

$$G(j\omega) = \frac{x_{ad}}{r_f} \frac{1}{(1 + \omega T'_{d0})}$$

Відлагодження комплексу програм обробки частотних характеристик синхронного генератора для вдосконалення самої програми і методики розрахунку по ній параметрів генераторів. При проведенні досліджень було виконано численні розрахунки аперіодичних характеристик за відомими параметрами схем заміщення низки потужних генераторів з подальшою обробкою їх за допомогою розробленого вище програмного комплексу. Використовувалася класична схема заміщення з числом контурів до п'яти по поздовжній і відповідно по поперечній осях. Розрахункові характеристики визначалися з точністю до сьомого знака включно (похибка на рівні 0,00001 %). Шляхом послідовного заокруглення похибка визначення характеристик збільшувалася до 1 %. Кількість точок її вимірювань варіювалася від 10 до 60.

Результати проведених чисельних експериментів в узагальненому вигляді для найбільш характерної для крупних синхронних машин аперіодичної характеристики наведено в табл. 1–3. У табл. 1 наведено залежність похибок вимірювань σ для «точної аперіодичної характеристики» від числа контурів схеми заміщення n машини, у табл. 2 – залежність похибок апроксимації σ_a від числа контурів схеми заміщення (n) і від похибок початкової інфо-

рмациі σ , у табл. 3 – залежність похибок апроксимації σ_a від кількості точок N вимірювання аперіодичної характеристики $I(t)$ і числа контурів схеми заміщення n .

У цьому експерименті (див. табл. 1) середньоквадратична похибка апроксимації «точної аперіодичної характеристики» для одно-, дво-, три-, чотири- і п'ятиконтурної схем заміщення генератора склала відповідно 8,2791; 3,41; 0,76; 0,03 і 0,01 %, що природно, оскільки аперіодична характеристика відповідала п'ятиконтурній схемі заміщення.

На підставі отриманих результатів можна зробити такі висновки .

1. Апробація розробленого програмного комплексу великою кількістю різних «точних» аперіодичних характеристик показала надійну роботу комплексу в частині чіткого виділення заданої кількості контурів «знятими експериментально» характеристиками і підтвердила правильність прийнятих при розробці рішень.

2. Як згадувалося, точність вимірювань при знятті аперіодичних характеристик не перевищує 0,5 % (враховуючи складність експерименту вона дещо гірша). З цього випливає, що при існуючій похибці початкової інформації чітко виділяються тільки по два (іноді три) контури по поздовжній (з яких один – це контур збудження) осі синхронної машини. У випадку осі d позначається додатковий сильний екрануючий ефект контура збудження. По осі q точність отримання початкової інформації виходить за межі існуючих можливостей.

Таблиця 1

N	t	$I(t)$	Кількість контурів схеми заміщення, n				
			1	2	3	4	5
1	0,009	43,29015	0,0000	- 0,0001	0,001	0,0001	0,0000
2	0,029	38,62108	- 0,4765	- 0,7295	0,0103	- 0,0011	- 0,0001
3	0,049	34,96023	- 0,0205	0,0135	- 0,0109	- 0,0011	- 0,0001
4	0,070	31,97258	0,0825	0,0553	- 0,0003	0,0009	0,0000
5	0,089	29,56752	0,1121	0,0497	0,0014	0,0011	- 0,0000
6	0,111	27,60237	0,1228	0,0282	- 0,0001	0,0000	- 0,0000
7	0,131	25,69375	0,1242	0,0167	- 0,0001	- 0,0003	0,0000
8	0,151	24,28793	0,1241	0,0103	- 0,0001	- 0,0002	0,0001
9	0,171	23,04126	0,1210	0,0037	- 0,0029	- 0,0014	0,0001
10	0,191	21,29084	0,1250	0,0041	0,0015	0,0009	- 0,0000
-	-	-	-	-	-	-	-
51	0,501	13,59375	0,1258	0,0018	0,0027	0,0012	0,0000
52	0,521	13,27673	0,1210	- 0,0035	- 0,0019	- 0,0012	0,0000
53	0,538	13,08390	0,1165	- 0,0072	- 0,0061	- 0,0017	- 0,0001
54	0,557	12,89142	0,1148	- 0,0069	- 0,0074	- 0,0009	0,0001
55	0,578	12,75328	0,1130	0,0017	- 0,0075	0,0007	- 0,0001
56	0,597	12,66535	0,1100	0,0176	- 0,0064	- 0,0015	- 0,0001
57	0,618	12,38097	0,1010	0,0315	- 0,0083	- 0,0032	0,0000
58	0,654	12,14554	0,0920	0,0405	- 0,0087	- 0,0033	0,0000
59	0,674	12,06165	0,0740	0,0444	- 0,0083	- 0,0017	0,0000
60	0,694	11,95323	0,0510	0,0385	- 0,0008	0,0008	0,0000
-	-	-	-	-	-	-	-
90	0,912	10,48694	0,0070	0,0062	0,0017	- 0,0003	0,0001
91	0,932	10,37063	0,0082	0,0058	0,0012	0,0008	0,0001
92	0,941	10,14521	0,0076	0,0053	0,0004	0,0007	- 0,0001
93	0,961	10,13154	0,0065	0,0047	- 0,0003	- 0,0001	- 0,0001
94	0,982	10,04073	0,0060	0,0041	- 0,0007	- 0,0003	0,0001
95	1,002	9,89126		0,0038	- 0,0001	- 0,0004	0,0001
96	1,061	9,74924	0,0052	0,0033	0,0003	0,0006	0,0000
97	1,177	9,36574	0,0043	0,0029	0,0003	0,0003	- 0,0001
98	1,319	8,98562	0,0035	0,0021	0,0002	0,0032	0,0000

99	1,428	8,81825	0,0024	0,0018	0,0000	0,0002	- 0,0001
-	-	-	-	-	-	-	-
∞	5,000	4,17752	0,0001	- 0,0001	- 0,0001	- 0,0001	0,0000

Таблиця 2

Помилки початкової інформації, % σ		Кількість контурів схеми заміщення, n				
		1	2	3	4	5
Вісь d	0,00001	5,421	0,151	0,031	0,0024	0,00015
	0,0001	5,515	0,150	0,042	0,0051	0,00042
	0,001	5,647	0,180	0,054	0,0034	0,00035
	0,01	5,418	0,176	0,050	0,0033	0,00024
	0,1	6,341	0,197	0,068	0,0061	0,00051
	1,0	6,143	0,218	0,071	0,0080	0,00063

Таблиця 3

Кількість точок вимірювань, N		Кількість контурів схеми заміщення, n				
		1	2	3	4	5
Вісь d	60	3,148	0,341	0,121	0,0098	0,00012
	50	3,112	0,376	0,172	0,0123	0,00025
	40	3,518	0,402	0,156	0,0086	0,00029
	30	3,762	0,415	0,185	0,0230	0,00037
	20	4,012	0,683	0,217	0,0287	0,00056
	10	5,769	0,825	0,544	0,0348	0,00079

Аперіодичні характеристики, що використовуються у цьому чисельному експерименті, є «точними», тому згадане обмеження при обробці натурних характеристик дуже сильне. Звичайно при обробці експериментально отриманих аперіодичних характеристик помилки апроксимації лежать у таких межах: 5...6 % для одноконтурної схеми заміщення, 1...3 % для двоконтурної і 0,5...1,0 % для триконтурної у випадку осі d . Проте при натурному експерименті кількість точок аперіодичної характеристики, що знімається, перевищує 100 навіть при точності визначення з похибкою у 0,5...1,0 %. У цьому випадку не гарантовано, що параметри третіх контурів еквівалентної схеми заміщення синхронного генератора не містять великої систематичної помилки.

3. Оскільки аперіодичні характеристики «точні», у чисельному експерименті збільшення «похибки початкової інформації» слабко позначається на помилках апроксимації, тобто розроблений програмний комплекс у цьому випадку навіть при малих N дає змогу одержувати точний результат. У випадку ж зменшення кількості точок вимірювань характеристик спостерігається різке збільшення помилок апроксимації. Звичайно, що для експериментально знятих аперіодичних характеристик результат буде ще гіршим. Отже, необхідно виконувати як рекомендовані нижні межі для N , так і підвищувати точність вимірювань.

Проведення чисельного експерименту для визначення сукупності параметрів окремих типів синхронних генераторів за їх аперіодичними характеристиками. На основі розробленого програмного комплексу обробки аперіодичних характеристик отримано перехідні параметри, що відповідають наведеним у двоконтурних схемах заміщення ряду крупних синхронних генераторів табл. 4.

Тут наведені дані трьох турбогенераторів потужністю 100...800 МВт і одного гідрогенератора, аперіодичні характеристики яких було отримано в досліді раптового симетричного короткого замикання і тільки по поздовжній осі [6].

Таблиця 4

Тип генератора	Параметри							Прим.
	x_d	x'_d	x''_d	T'_d	T''_d	T'_{d0}	T''_{d0}	
ТВВ-800	2,327	0,317	0,268	1,351	0,028	8,308	0,039	

ТГВ-500	2,281	0,362	0,254	0,995	0,049	5,951	0,064	
ТВВ-320 з демпфер. сис- темою	1,725	0,268	0,191	0,905	0,031	6,017	0,042	
СВФ-1690	1,841	0,489	0,337	1,550	0,083	5,820	0,109	Фаза <i>a</i>
СВФ-1690	1,858	0,490	0,300	1,492	0,080	5,660	0,135	Фаза <i>b</i>
СВФ-1690	1,898	0,470	0,306	1,504	0,080	6,080	0,127	Фаза <i>c</i>
СВФ-1690	1,866	0,483	0,314	1,515	0,081	5,850	0,124	Середн.

Таблиця 5

Тип генератора	Параметри														Методи визначення
	x_d	x'_d	x''_d	x_q	x'_q	x''_q	T'_d	T''_d	T'_{d0}	T''_{d0}	T'_q	T''_q	T'_{q0}	T''_{q0}	
ТВВ-800	2,33	0,313	0,233	2,32	-	0,274	1,3	0,160	9,68	0,222	-	-	-	-	Заводський
	2,327	0,317	0,268	-	-	-	1,351	0,028	8,308	0,039	-	-	-	-	КЗ
	2,307	0,303	0,236	2,045	1,273	0,280	1,171	0,191	8,672	0,025	2,007	0,085	2,782	0,270	АФЧХ
ТГВ-500	2,41	0,373	0,173	-	-	-	0,910	0,114	5,80	0,246	-	-	-	-	Заводський
	2,19	0,550	0,377	2,05	1,22	0,500	1,245	0,044	5,69	0,064	1,00	0,127	1,57	0,132	ЗПС
	2,281	0,362	0,254	-	-	-	0,995	0,049	5,951	0,064	-	-	-	-	КЗ
ТВВ-320 з демпферною системою	1,72	0,280	0,173	1,69	-	0,318	0,910	0,114	5,80	0,185	-	-	-	-	Заводський
	1,69	0,298	0,226	1,43	0,787	0,365	0,702	0,024	4,09	0,131	0,540	0,072	0,954	0,159	ЗПС
	1,725	0,268	0,191	-	-	-	0,905	0,031	6,017	0,042	-	-	-	-	К.З.
	1,70	0,286	0,200	1,56	0,471	0,280	0,894	0,028	5,5	0,040	0,384	0,038	1,23	0,064	АФЧХ
СВФ-1690	1,869	0,462	0,321	1,08	-	0,331	1,58	0,092	6,38	0,133	-	0,117	-	0,381	Заводський
	1,866	0,483	0,314	-	-	-	1,515	0,081	5,850	0,124	-	-	-	-	К.З.
	1,98	0,445	0,375	1,33	0,840	0,380	1,44	0,150	6,90	0,170	0,825	0,070	1,30	0,148	Графоаналіт.
	1,983	0,445	0,325	1,264	0,633	0,287	1,293	0,083	6,044	0,092	0,325	0,041	0,762	0,079	АФЧХ

Зауваження: у табл. 5 (колонка «методи визначення») вказано такі методи визначення параметрів потужних синхронних генераторів: «Заводський» – чисто розрахунковий метод по геометрії статора і ротора, дає значні помилки для надперехідних параметрів; «КЗ» – відомий класичний метод визначення параметрів машин з досліду короткого замикання, але лише по поздовжній осі. При правильному плануванні експерименту дає точні та надійні результати, оскільки магнітний стан машини відповідає її стану в аварійних умовах; «ЗПС» – методика визначення частотних характеристик турбогенераторів за способом затухання постійного струму в обмотках нерухомої машини. Далі, з отриманих частотних характеристик тим чи іншим способом розраховують її параметри; «АФЧХ» – зняття частотних характеристик методом гармонічного впливу, який, на відміну від перелічених, реєструє не перехідні процеси, а усталені значення АФЧХ на деякій заданій послідовності частот гармонічного впливу. Визначення параметрів за цими частотними характеристиками здійснюється за описаним методом.

Таким чином, проведені дослідження показують, що існуючі методи експериментального визначення параметрів дають змогу отримати їх надійні оцінки для схем заміщення, що містять по два-три контури у поздовжній і поперечній осях. Подальше ускладнення схем заміщення синхронного генератора може бути виправдане тільки при виконанні уточненого аналізу і створенні вимірювальної системи та методики проведення натурального експерименту, що забезпечують отримання вихідної інформації з похибкою не більше 0,5 %.

1. *Винер Н.* Интеграл Фурье и некоторые его приложения. – М.: Физматиздат, 1963. – 256 с.
2. *Жерве Г.К.* Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
3. *Коваленко В.П., Лернер Л.Г., Rogozin Г.Г., Сидельников А.В., Твердяков В.В.* Определение электромагнитных параметров электрических машин методом затухания постоянного тока. – К.: Наук. думка, 1975. – С. 32.
4. *Коваленко В.П., Соколов Н.И., Твердяков В.В., Якушов В.М.* Определение электромагнитных параметров мощных электрических машин методом гармонического воздействия. – К.: Наук. думка, 1976. – С. 32.
5. *Коваленко В.П., Твердяков В.В., Якушов В.М.* Определение параметров синхронных машин частотным методом // Моделирование и расчет на ЦВМ режимов энергетических систем. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 60–65.

6. Твердяков В.В. Параметры мощных синхронных генераторов, определенные по экспериментальным частотным характеристикам // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2003. – № 3(6). – С. 77–79.

УДК 621.313.001.1

В.В. Твердяков, канд. техн. наук

Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследование и определение совокупности параметров мощных синхронных генераторов по экспериментальным аperiodическим характеристикам

Рассмотрен алгоритм и разработана программа определения электромагнитных параметров мощных синхронных генераторов по экспериментальным аperiodическим характеристикам. Выполнены расчеты их параметров по экспериментально снятым аperiodическим характеристикам. Библ. 6, табл. 5.

Ключевые слова: синхронный генератор, параметры, эксперимент, алгоритм, аperiodические характеристики.

V.V. Tverdyakov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Research and determination of aggregate of the parameters of the powerful synchronous generators by experimental aperiodic characteristics

The algorithm of determining electromagnetic parameters of power synchronous generators from experiment aperiodic characteristics is considered in this article. The research program of determining parameters is developed. The calculations of generator parameters from experiment characteristics are performed. References 6, tables 5.

Key words: synchronous generator, parameters, experiment, algorithm, aperiodic characteristics.

Надійшла 7.07.2011

Received 7.07.2011