

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА

*д. т. н. К. Василів, аспірант А. Герман
Львівський національний аграрний університет*

Аналіз проблеми. Завдяки досягненням в області електроніки за останні десятиліття створено принципово новий клас електронних приладів [1], які відкрили практично необмежені можливості розробки як нових електротехнічних систем і комплексів, так і електричних машин включно із синхронними генераторами (СГ) [2]. До таких електронних пристроїв належать перетворювачі частоти (випрямлячі, інвертори та тощо), які на сьогодні є незамінними структурними елементами в сучасних електротехнічних комплексах і системах, а також системах збудження електричних машин змінного струму. Сучасний стан промислового устаткування загалом і електроенергетики та електромеханіки, зокрема, характерний високим рівнем автоматизування процесів. Досягнути високоефективного рівня функціонування таких систем без використання електронних приладів практично неможливо. Типовим представником сучасного електротехнічного устаткування слугують прилади з вентильними перетворювачами частоти, зокрема, системи випрямлення трифазного електричного струму, які можуть бути базовою компонентою систем збудження синхронних машин [2]. Системи випрямлення струму можуть формуватися на базі діодів, тиристорів, або ж інших електронних приладів. Завдання таких досліджень – отримати достовірну інформацію про поведінку електротехнічних систем у різних режимах роботи. Цю інформацію можна отримати або з допомогою експериментальних досліджень, або шляхом математичного моделювання. Багатолітня практика переконливо доводить, що останній спосіб [3] є доцільніший, бо саме математичне моделювання дає змогу практично необмежено варіювати параметрами, що забезпечує високу ефективність проектно-конструкторських робіт.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Наявність вентильного перетворювача частоти, зокрема, системи випрямлення трифазного електричного струму, які можуть слугувати базовою компонентою систем збудження синхронних машин характерний нелінійним типом зламу. Тому вибір методів і теорій моделювання подібних систем має ґрунтуватися на можливостях розробки математичних моделей з високим рівнем адекватності. Такі вимоги повністю задовольняє теорія математичного моделювання електромашинно-вентильних систем (ЕМВС) [3]. Вона ґрунтується на методі вузлових потенціалів [4] і дає змогу побудувати математичну модель довільної ЕМВС за модульним принципом, що суттєво підвищує ефективність роботи як під час розробки математичної моделі, так і її програмної реалізації.

Постановка завдання. Отже, необхідно розробити математичну модель і відповідний програмний комплекс для аналізу електромагнітних процесів, які відбуваються в системі випрямлення електричного струму за схемою “Трифазна електрична мережа – тиристорний мостовий випрямляч – активно-індуктивне навантаження”. Цю схему розглядають як базову компоненту вентильної системи збудження синхронного

генератора. Обмотку збудження синхронного генератора є активно-індуктивне навантаження в системі випрямлення.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом математичного моделювання є трифазна мостова система випрямлення електричного струму, схема силового електричного кола якої зображена на рис. 1.

Тут: E, φ, i, R, L – позначено такі електричні величини: електрорушійну силу (ЕРС), електричні потенціали, електричний струм, активний опір та індуктивність відповідно; М, КГ, АГ, Н – структурні елементи системи: трифазна електрична мережа, катодна і анодна вентильні групи та активно-індуктивне навантаження відповідно. В індексах буквами позначено належність величин до відповідних структурних елементів, а цифрами вказано номер електричної гілки структурних елементів.

Математичну модель трифазної системи випрямлення електричних струмів розробимо згідно з теорією математичного моделювання електромашино-вентильних систем [4]. Згідно з нею основою математичного моделювання ЕМВС є метод вузлових потенціалів, а самі математичні моделі довільних ЕМВС розробляють за модульним принципом, тобто будують з готових математичних моделей структурних елементів. В даному випадку такими структурними елементами трифазної системи випрямлення струмів слугують математичні моделі трифазних: електричної мережі, катодної та анодної вентильних груп, а також математична модель активно-індуктивного навантаження.

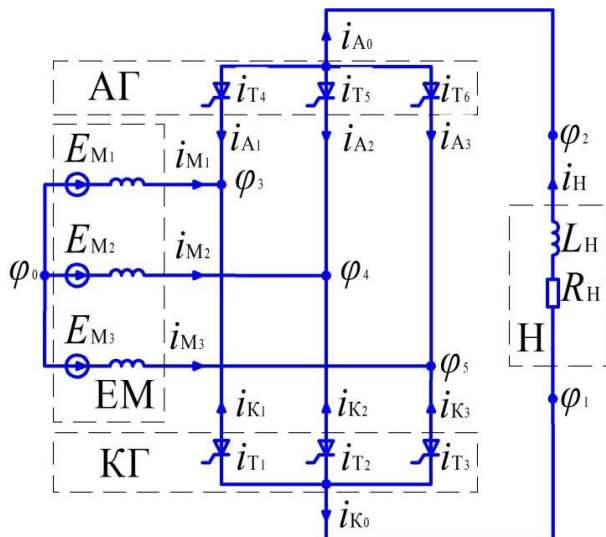


Рис. 1. Схема системи випрямлення струму.

Розробимо математичну модель анодної вентильної групи.

Анодну вентильну групу також зобразимо 4-полюсником, а електричну рівновагу опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок:

$$pi_A + G_A \cdot \varphi_A + T_A, \quad (1)$$

де $i_A = (i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_{A0})$ – вектор струмів зовнішніх гілок, в якому $i_{A0} = i_H = \sum_{j=1}^{3f} i_{Aj}$, а i_{Aj} – струм j -го вентиля анодної групи ($j = 1, 2, 3$);

– матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів;

$\varphi_A = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$ – вектор потенціалів полюсів катодної тиристорної групи.

Складовими матриці коефіцієнтів G_A та вектора T_A є: $1/L_{Aj}$ – обернена індуктивність тиристора; R_{Aj}, i_{Aj} – активний опір і струм j -ї вентиляльної гілки ($j = 1, 2, 3$).

Математичну модель трифазної електричної мережі, трифазну катодну вентиляльну групу та модель активно-індуктивного навантаження розробляють аналогічно.

Загальна система рівнянь електричного стану. Повна система рівнянь електричної рівноваги записана в базисі електричних потенціалів незалежних вузлів схеми рис. 1 і має такий вигляд:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (2)$$

де $A = \sum_{j=EM}^H \Pi_j \times G_j \times \Pi_j'$ – матриця коефіцієнтів; $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5)$ – вектор потенціалів

незалежних вузлів схеми; $B = \sum_{j=EM}^H \Pi_j' \times T_j$ – вектор вільних членів, а Π_j, G_j, T_j, Π_j' –

матриці інциденції, матриця коефіцієнтів, вектор вільних членів та матриці, транспоновані до матриць Π_j для j -го структурного елемента схеми ($j = EM, KГ, АГ, H$).

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів. Вхідні дані для розрахунку електромагнітних процесів системи на рис. 1 поділимо на дві групи. До першої віднесемо e_M, L_M, R_M, f_M, N_f – амплітуду електрорушійної сили, індуктивність, активний опір фазних гілок мережі, частоту та кількість фаз EM; L_W, R_W – індуктивність та активний опір для стану провідності катодної та анодної вентиляльних груп; R_H, L_H – активний опір та індуктивність активно-індуктивного навантаження; t_K – кінцевий час інтегрування; Δt – крок інтегрування.

До другої групи вхідних даних віднесемо вектор K_{II} стану вентилів та початкові умови, які об'єднані у вектор інтегрованих змінних V . Цей вектор є водночас результатом моделювання і мають структуру:

$$V = (i_{M1}, i_{M2}, i_{M3}, i_{K1}, i_{K2}, i_{K3}, i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_H, t),$$

де t – час інтегрування;

$$K_{II}(K_{T1}, K_{T2}, K_{T3}, K_{T4}, K_{T5}, K_{T6}).$$

Алгоритм розрахунку є такий:

- на підставі початкових умов вектора V , масиву стану вентилів K_{II} і даних першої групи формують матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів структурних елементів і через них – матриця коефіцієнтів A та вектор вільних членів B всієї системи рівнянь (2);
- розв'язують систему рівнянь (2) стосовно вектора φ ;
- на зворотному ході на підставі вектора φ визначають вектор інтегрування pV , який дорівнює похідній вектора інтегрованих змінних V за часом t ($pV=dV/dt$) і має таку структуру:

$$pV = (pi_{M1}, pi_{M2}, pi_{M3}, pi_{K1}, pi_{K2}, pi_{K3}, pi_{A1}, pi_{A2}, pi_{A3}, pi_H, 1);$$

- одним із явних методів числового інтегрування на підставі вектора інтегрування pV та кроку інтегрування Δt визначають нове значення вектора V з урахуванням інвертування системи диференціальних рівнянь.

Описану процедуру продовжують до виходу поточного часу інтегрування t за межі кінцевого часу інтегрування t_K .

На основі математичної моделі розроблено програмний комплекс у середовищі програмування C++ BUILDER 6.0. Для ілюстрації його роботи досліджено електромагнітні процеси мостового випрямляча зі значенням кута регулювання 30° .

Отже, результатами розрахунку електромагнітних процесів є розрахункові залежності фазних напруг електричної мережі та випрямленої напруги протягом заданого часу (рис. 2).

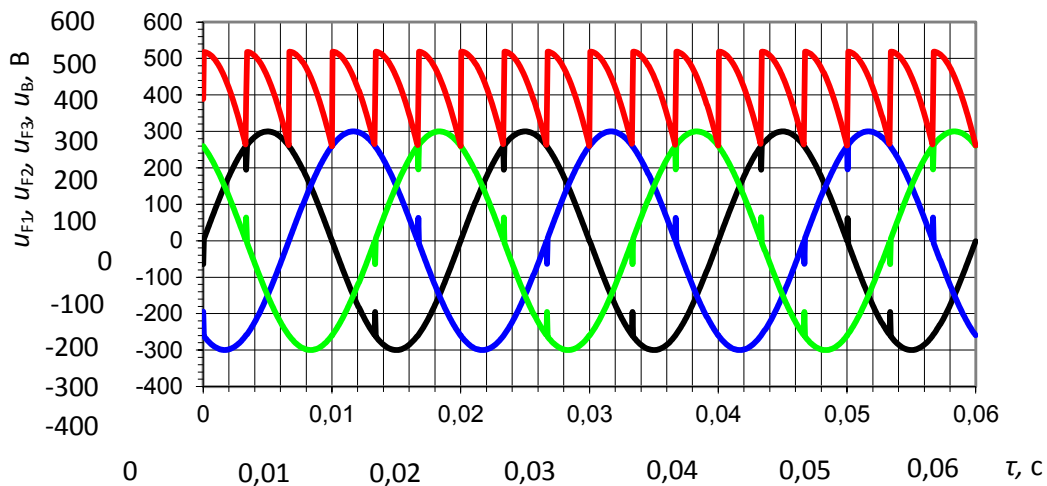


Рис. 2. Розрахункові залежності фазних напруг електричної мережі та випрямленої напруги для $\alpha_p=30^\circ$ від часу.

Висновки. На підставі прийнятих вихідних допущень, які покладені в основу математичної моделі, та одержаних результатів розрахунків електромагнітних процесів, робимо висновок про те, що математичній моделі системи збудження синхронного генератора притаманний високий рівень адекватності.

Програмний комплекс, розроблений за алгоритмом, отриманим на підґрунті математичної моделі, дає змогу за допомогою персонального комп'ютера всебічно досліджувати електромагнітні процеси, які відбуваються в модуляторі, щоб прогнозувати роботу системи синхронного генератора.

Бібліографічний список

1. Берштейн И. Я. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока / И. Я. Берштейн. – М. : Энергия, 1968. – 88 с.
2. Головкин Н. Н. Математическая модель синхронной машины, питаемой от преобразователей частоты / Н. Н. Головкин. – М. : (Рукопись деп. в Информэлектро 03.05.83, № 1268 эн –Д83).
3. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львов : Висш. шк., 1986. – 164 с.
4. Василів К. М. Метод квазікомбінованих схем і вузлових уточнень струмів для моделювання статичних перетворювачів частоти / К. М. Василів // Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка”: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів : ДУ “ЛП”. – 2000. – № 400. – С. 10–17.

К. Василів, А. Герман. Математична модель системи збудження генератора.

Розроблена математична модель системи збудження генератора та на її підставі – відповідний програмний комплекс, який за допомогою персонального комп'ютера, дає змогу моделювати електромагнітні процеси, в системі збудження генератора.

Ключові слова: математична модель, генератор, електрична мережа, збудження генератора, алгоритм.

K. Vasyliv, A. Herman. Mathematical model of excitation of the generator.

The mathematical model of generator excitation and on its basis – the relevant software package that using a personal computer, allows you to simulate electromagnetic processes in system generator excitation.

Keywords: mathematical model, generator, electrical network, excitation generator, algorithm.

К. Васи́лив, А. Герман. Математическая модель системы возбуждения генератора.

Разработанная математическая модель системы возбуждения генератора и на ее основании – соответствующий программный комплекс, который с помощью персонального компьютера, позволяет моделировать электромагнитные процессы в системе возбуждения генератора.

Ключевые слова: математическая модель, генератор, электрическая сеть, возбуждение генератора, алгоритм.