

Л. А. БІЛИЙ, О. С. ПОЛІЩУК, С. П. ЛІСЕВИЧ, А. О. ПОЛІЩУК

ФЕРОРЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИНХРОННИХ МАШИН

Иллюстрируются широкие возможности нахождения всех устойчивых и неустойчивых феррорезонансных режимов работы и назначения границ зоны самозбуждения синхронных генераторов на основе модели чувствительности змінних стану до початкових умов. Апробація методу проведена на прикладі синхронного генератора, диференціальні рівняння якого мають нормальну форму Коші і який працює у режимі двофазного вмикання на ємність при обриві третьої фази.

Ключові слова: синхронна машина, феррорезонансний режим, модель чутливості до початкових умов, зона стійкості.

Иллюстрируются широкие возможности нахождения всех устойчивых и неустойчивых феррорезонансных режимов работы и определение границ зоны самозбуждения синхронных генераторов на основе модели чувствительности переменных состояния к начальным условиям. Апробація методу проведена на примере синхронного генератора, дифференциальные уравнения которого имеют нормальную форму Коши и работающий в режиме двухфазного включения в емкость при обрыве третьей фазы.

Ключевые слова: синхронная машина, феррорезонансный режим, модель чувствительности к начальным условиям, зона устойчивости.

Purpose. It is proposed to use the method of sensitivity of variable models to the initial conditions for the calculation of ferroresonance modes of operation of saturated electric machines. **Methodology.** The calculation algorithms are based on Newton's iterative formula. The initial values of the variables determine the area of attraction of stable or unstable modes. **Results.** The results are illustrated by an example of the analysis of one of the most difficult modes of operation - two-phase switching on the capacity of a synchronous generator at the breakage of the third phase. **Originality.** The originality of the method is the ability to determine all the stable and unstable modes, as well as the self-excitation zone of the synchronous generator. **Practical value.** The method is universal and can be used to investigate resonance phenomena in any circle using steel.

Keywords: synchronous machine, ferroresonance mode, initial conditions sensitivity model, stability zone.

Вступ. Неявнополюсні машини змінного струму на сучасному етапі розвитку електроенергетики займають провідне місце в системі енергогосподарства промислово розвинених країн. Тому зрозуміло, наскільки важливим є подальше вивчення усіх процесів, які мають місце при їх роботі.

Синхронна машина, що працює на активно-ємнісному навантаженні, є коливальною системою, яка складається з періодично змінюваної індуктивності фазових обмоток, ємності і активного опору. У цій системі при певних умовах може початися довільне наростання струму у контурах машини, тобто самозбуждення, що є одним із різновидів статичної нестійкості режиму роботи синхронної машини.

Резонансні явища в колах зі сталлю відомі давно, але лише з розвитком теорії нелінійних коливань ці явища отримали достатньо повне теоретичне обґрунтування, коли для їх дослідження було застосовано методи Ляпунова і Пуанкаре. Метод малого параметра використовувався для кількісної оцінки коливань з достатньою для практичних результатів точністю. Метод фазового портрету і аналіз фазової структури дав можливість якісної оцінки систем другого порядку. Ця теорія поступово було поширено на автономні і неавтономні системи.

Не дивлячись на складність і обмежені можливості математичного апарату, теорія нелінійних коливань розкрила ряд особливостей, які принципово відрізняють нелінійні коливальні системи від лінійних. До цих особливостей, у першу чергу, слід віднести стрибкоподібну зміну режиму коливань при зміні параметрів схеми, виникнення субгармонічного резонансу, тобто резонансу на частотах, відмінних від частоти вимушуючої сили.

Через відсутність математично строгого методу аналізу коливальних систем виникла необхідність застосування різних методів для дослідження явищ феррорезонансу: побудови рівнянь з періодичними коефі-

цієнтами (метод Ляпунова); малого параметра; комплексних амплітуд. Для оцінки стійкості періодичних коливань в нелінійному колі також необхідно було використовувати різні методи та критерії [1].

Постановка завдання. Запропонований нами метод побудови моделі чутливості до початкових умов на основі єдиного математичного апарату – теорії нелінійних диференціальних рівнянь, дає змогу знайти у часових межах, з наперед заданою точністю, усі стійкі та нестійкі розв'язки, визначити їх стійкість, а в разі потреби – параметричну чутливість нелінійної системи до зміни її параметрів.

У нелінійних колах з обертальними машинами явище феррорезонансу нероздільне з явищем самозбуждення. Така єдність пояснюється загальністю фізичної природи, а саме – параметричним походженням обох видів резонансу [2, 3].

Основний матеріал. Покажемо ефективність застосування методу побудови моделі чутливості до початкових умов для розрахунку феррорезонансних режимів насичених електричних машин. Він дає змогу знайти граничні режими, які відповідають синхронному самозбужденню, тобто втраті стійкості на основній частоті.

Проілюструємо розв'язування таких задач на прикладі одного з найбільш важких режимів роботи – двофазного вмикання на ємність синхронного генератора при обриві третьої фази, математична модель якого міститься в [4].

У розрахунках використано наступні дані: $r_s = 7 \text{ Ом}$; $r_f = 5 \text{ Ом}$; $\alpha_s = 82,6 \text{ Гн}^{-1}$; $\alpha_f = 4,3 \text{ Гн}^{-1}$; $u_f = 14 \text{ В}$; $\omega = 314 \text{ ел. рад/с}$; $C = 0,6369 \cdot 10^{-4} \text{ мкФ}$.

Для апроксимації кривої намагнічування використано сплайн:

$$\Psi_m = \begin{cases} 0,0216 \cdot i_m + 1,964 - 2,154 \exp(-0,258 \cdot i_m), & i_m > 2; \\ 0,365 \cdot i_m, & i_m \leq 2. \end{cases}$$

Об'єктом дослідження з вказаними вище параметрами та характеристикою намагнічування був модельний синхронний генератор, виконаний на основі машини АК52-4 ($P_H = 4,5$ кВт, $U_H = 230$ В, $I_H = 11,3$ А).

Покажемо надзвичайно широкі можливості методу побудови моделі чутливості до початкових умов стосовно знаходження усіх стійких і нестійких ферорезонансних режимів роботи та визначення границь зони самозбудження синхронного генератора при двофазному вмиканні його на ємність і обриві третьої фази.

Початкове наближення визначає зону притягання стійких або нестійких режимів.

Пряме інтегрування рівнянь стану аж до усталення процесу, в разі довготривалого перехідного процесу, вимагає проходження часового інтервалу $[0, T]$, що дорівнює десяткам, а часто і сотням періодів. Подана на рис. 1 осцилограма яскраво ілюструє ефективність методу побудови моделі чутливості до початкових умов при розрахунку ферорезонансних режимів. Крім того, пряме інтегрування рівнянь стану не дає змоги знайти нестійкі режими.

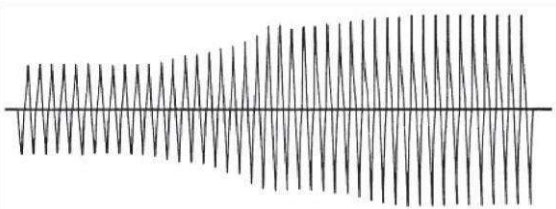


Рис. 1 – Осцилограма самозбудження модельного синхронного генератора у режимі двофазного вмикання на ємність при обриві третьої фази

На рис. 2 наведено результати розрахунку і експерименту ферорезонансного режиму в системі синхронний генератор-конденсатор, що має два стійких і один нестійкий стани. Криву (1) одержано при нульовому наближенні, а криву (2) – при достатньо великому, криву (3), що відповідає нестійкому стану – при середньому арифметичному значенні початкових умов входження в періодичні стійкі стани. Суцільні криві отримано при розрахунку, а криві, позначені зірочками, – в результаті експерименту із осцилограми (див. рис. 1).

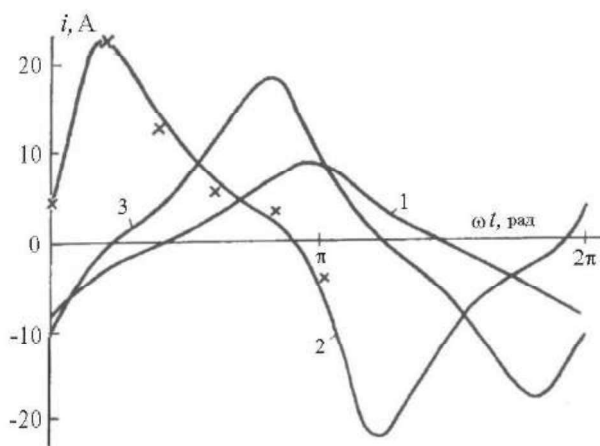


Рис. 2 – Криві струмів якоря модельного синхронного генератора при роботі: 1 – у стійкому режимі до самозбудження; 2 – у стійкому режимі після самозбудження; 3 – у нестійкому режимі

Стійкі стани отримано за три ітерації, нестійкий – за чотирнадцять.

Діюче значення струму якоря визначається як сумарне значення струмів у вузлових точках, рівномірно віддалених на періоді, та розділене на кількість вузлів на періоді.

$$I_s = \sum_{n_j=1}^n i_{sj}$$

де n – кількість точок на періоді; i_{sj} – струм якоря в j -му вузлі.

Для отримання усталеного значення струму якоря в першому стійкому режимі як початкове наближення використано значення струму $i_s(0) = -7$ А. Як бачимо, мети досягнуто за шість ітерацій формули Ньютона (рис. 4). Величина амплітудного значення струму $i_s = 20,1$ А вказує на те, що цей режим відповідає точці b'' залежності (рис. 3).

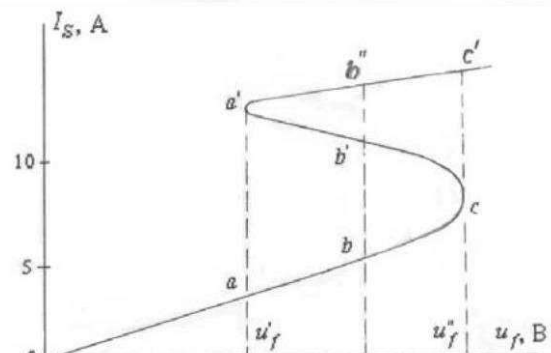


Рис. 3 – Залежність діючого значення струму якоря від напруги збудження модельного синхронного генератора, яка ілюструє багатозначність періодичних режимів при ферорезонансі

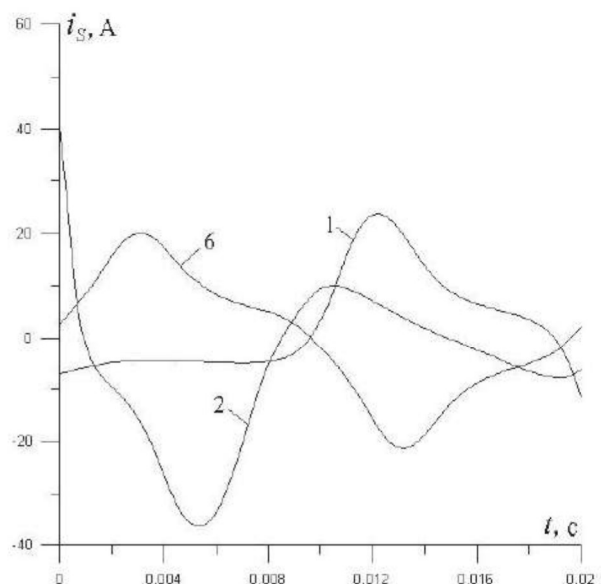


Рис. 4 – Розрахункові криві струму якоря на шести ітераціях, що призвели до першого стійкого періодичного режиму модельного синхронного генератора

Зона притягання другого стійкого режиму, який характеризується періодичними значеннями струмів якоря та індуктора, а також напруги на конденсаторі

модельного синхронного генератора, що працює в режимі двофазного включення на ємність при обриві третьої фази, знайдено при нульових початкових умовах, тобто $i_S(0) = 0$, $i_f(0) = 0$. Ці початкові умови протягом двох послідовних ітерацій формули Ньютона призвели до ustalених значень струму якоря (рис. 5).

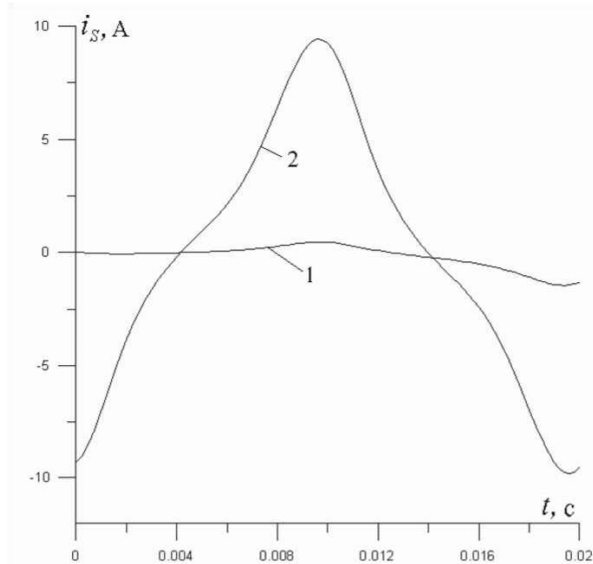


Рис. 5 – Розрахункові криві струму якоря на двох послідовних ітераціях, що призвели до другого стійкого періодичного режиму модельного синхронного генератора

Амплітудне значення струму якоря, що дорівнює приблизно 10 А, дає підставу стверджувати, що цей ustalений режим відповідає точці *b* залежності $I_S = I_S(U_f)$ (рис. 3). Розрахунок параметрів ферорезонансного контуру, напруг на конденсаторах є необхідним, тому що тільки при наявності ємності у певних умовах може початися довільне зростання струму синхронної машини – явище, яке отримало назву самозбудження. І хоча перед нами не стоїть завдання дослідити умови самозбудження і усіх процесів, що супроводжують його, проте розроблені нами методи аналізу дають змогу успішно розв'язувати їх.

У випадку багатозначності періодичних процесів пряме інтегрування рівнянь стану електротехнічного пристрою не призводить до знаходження усіх стійких і нестійких режимів. Цього недоліку позбавлений метод побудови моделі чутливості до початкових умов.

Наприклад, прийнявши початковими умовами значення струму якоря $i_S(0) = -27$ А, струму індуктора $i_f(0) = -21$ А і напруги на конденсаторі $u_C(0) = -1$ В модельного синхронного генератора з двофазним включенням на ємність та розірваною третьою фазою, потрапимо в зону притягання нестійкого режиму. Розв'язування рівнянь періодичності при вибраних граничних умовах з використанням ітераційної формули Ньютона впродовж дванадцяти ітерацій призводить до періодичного процесу генератора. Враховуючи, що напруга збудження не змінюється при розрахунках усіх трьох режимів, а знайдене значення струму якоря дорівнює приблизно 13 А, робимо висновок про отримання нестійких ustalених значень струму якоря (рис. 6).

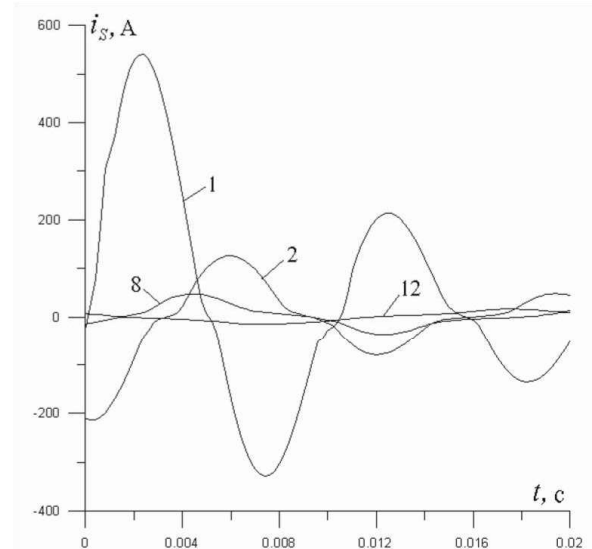


Рис. 6 – Розрахункові криві струму якоря на дванадцяти ітераціях, що призвели до нестійкого режиму модельного синхронного генератора

Порівняльна ілюстрація першого стійкого (1), другого стійкого (2) і нестійкого (3) ustalених режимів роботи модельного синхронного генератора у ферорезонансному режимі показано на рис. 7.

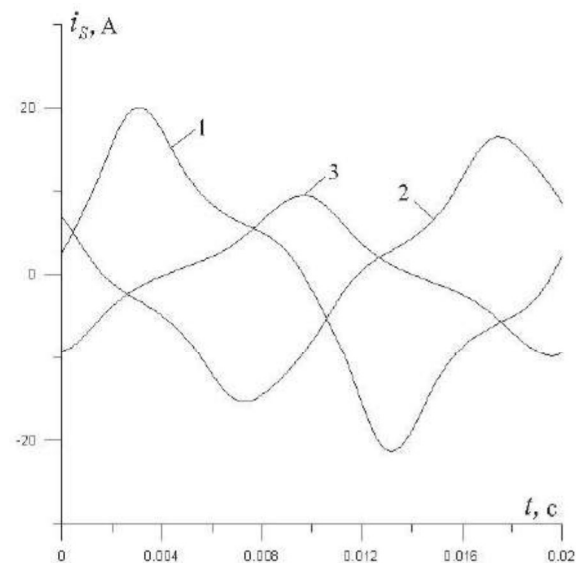


Рис. 7 – Струм якоря у двох стійких до (2) і після (1) самозбудження і нестійкому (3) режимах модельного синхронного генератора

Отже, шляхом варіації початкового наближення, що визначає притягання одного з режимів, отримуємо усі стійкі та нестійкі режими. Крім того, метод побудови моделі чутливості дає змогу аналізувати субгармонічні коливання нелінійних електричних кіл. У цій роботі не ставиться завдання визначити діапазон зміни ємності електричного субкола, при якій можливе виникнення ферорезонансних режимів, хоча ніяких труднощів для розв'язування її методом побудови моделі чутливості не існує.

У випадку синхронного генератора нами було визначено зону його самозбудження іншим способом –

варіацією напруги збудження. Розрахунки показали, що ця зона (рис. 3) знаходиться в межах $u'_f = 5$ В, $u''_f = 15$ В.

Висновки

1. Розрахунок ферорезонансних режимів – складне завдання, розв'язати яке на основі інтегрування рівнянь стану до усталення процесу не завжди можливо через накопичення похибок чисельного інтегрування, особливо для довготривалих перехідних процесів. Крім того, пряме інтегрування рівнянь стану не дає змоги знайти нестійкі режими. Використання позачасових методів недоцільне через їх громіздкість та низьку точність.

2. Найбільш доцільною для розв'язування такого класу завдань є ідея безпосереднього отримання стаціонарного в обхід перехідного процесу при певному виборі початкових умов. Такий підхід дає змогу на основі одного алгоритму розв'язати такі завдання як розрахунок перехідних і усталених процесів та визначення статичної стійкості.

3. Ефективність використаного методу та його точність ілюструється розрахунком стійких і нестійкого станів синхронного генератора, який працює на активно-ємнісне навантаження.

Список літератури

1. Козий Б. І. Влияние насыщения на самовозбуждение неявнополюсного синхронного генератора, работающего на активно-емкостную нагрузку / Б. И. Козий, Р. В. Фильц // Изв. вуз., Электромеханика. – 1971. – № 11. – С. 31-35.
2. Долгинов А. И. Резонанс в электрических сетях и системах / А. И. Долгинов. – Л.: ГосЭнергоиздат, 1957. – 328 с.
3. Бессонов Л. А. Автоколебания в электрических цепях со сталью / Л. А. Бессонов. – М.; Л.: ГосЭнергоиздат, 1958. – 303 с.
4. Чабан В. И. Расчет феррорезонансных режимов синхронной машины. / В. И. Чабан, Л. А. Бильный // Изд. «Научная думка», «Техническая электродинамика». – 1975. – С. 98-101.
5. Білий Л. А. Аналіз періодичних процесів електро-енергетичних пристроїв на основі матриці переходу станів / Л. А. Білий, О. С. Поліщук, О. Л. Шпак, С. П. Лісевич // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». – 2019. – № 4 (1329). – С. 111-114.

References (transliterated)

1. Kozij B. I., Fil'c R. V. Vlijanie nasyshhenija na samovozbuzhdenie nejavnopoljusnogo sinhronnogo generatora, rabotajushhego na aktivno-emkosnuju nagruzku. [The effect of saturation on the self-excitation of a non-polar synchronous generator operating on the active-capacitive load] *Izv. vuz., Jelektromehanika*, 1971, no. 11, pp. 31-35.
2. Dolginov A. I. *Rezonans v jelektricheskix setjah i sistemah*. [Resonance in electrical networks and systems]. Moscow; Leningrad, GosJenergoizdat, 1957, 328 p.
3. Bessonov L. A. *Avtokolebanija v jelektricheskix cepjah so stal'ju*. [Self-oscillations in circuits with steel]. Moscow; Leningrad, GosJenergoizdat, 1958, 303 p.
4. Chaban V. I., Bilyj L. A. Raschet ferrozonansnyh rezhimov sinhronnoj mashiny. [Calculation of ferresonance modes of synchronous machine] *Izd. "Naukova dumka", "Tehnicheskaja jelektrodinamika"*, 1975, pp. 98-101.
5. Bilyj L. A., Polishchuk O. S., Shpak O. L., Lisevych S. P. Analiz periody'chny'x procesiv elektroenergety'chny'x pry'str oyiv na osnovi matry'ci perexodu staniv. [Analysis of periodic processes of electric power devices based on the state transition matrix] *Bulletin of NTU "Kharkiv Polytechnic Institute"*, no. 4 (1329), 2019, pp. 111-114.

Надійшла (received) 31.01.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Білий Л. А. Ферорезонансні режими роботи синхронних машин / Л. А. Білий, О. С. Поліщук, С. П. Лісевич, А. О. Поліщук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 41-44. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.07.

Бильный Л. А. Феррорезонансные режимы работы синхронных машин / Л. А. Бильный, О. С. Полищук, С. П. Лисевич, А. О. Полищук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 41-44. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.07.

Bilyj L. A. Ferresonance modes of operation of synchronous machines / L. A. Bilyj, O. S. Polishchuk, S. P. Lisevych, A. O. Polishchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 41-44. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.07.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Білий Леонід Адамович (Бильный Леонид Адамович, Bilyj Leonid Adamovich) доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, тел. +380965410766; ORCID: 0000-0002-9538-6908; e-mail: leonid_bilyi@ukr.net.

Поліщук Олег Степанович (Полищук Олег Степанович, Polishchuk Oleh Stepanovich) доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, Хмельницький національний університет, тел. +380987928210; ORCID: 0000-0002-9764-8561; e-mail: opolishchuk71@gmail.com.

Лісевич Світлана Петрівна (Лисевич Светлана Петровна, Lisevych Svitlana Petrivna) старший викладач, Хмельницький національний університет; тел. +380976721369; ORCID: 0000-0002-5501-9038; e-mail: lisevichsv@gmail.com.

Поліщук Андрій Олегович (Полищук Андрей Олегович, Polishchuk Andrii Olehovych) викладач, Хмельницький національний університет, тел. +380978625586; ORCID: 0000-0001-7887-7169; e-mail: andrepol215@gmail.com.