

УДК 62-83:621.313.3

О.Г. Плахтина, Б.Л. КопчакНаціональний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП
АТР Бидгощ, Інститут електротехніки (Польща).

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ З КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

© Плахтина О.Г., Копчак Б.Л., 2001

Розроблено математичну модель однофазного автономного джерела живлення на базі асинхронного генератора з самозбудженням і неперервної системи автоматичного регулювання напруги, проведено комп'ютерні дослідження джерела в різних режимах роботи.

Mathematical model of the single-phase independent power source on the basis of a three-phase induction generator with self-excite and continuous automatic control system of a voltage was designed, computer researches of the power source in different operational modes were carried out.

Ще донедавна найбільш поширеним джерелом електроенергії змінного струму для використання, наприклад, в автономних джерелах електричної енергії був синхронний генератор. Проте більш надійною і простою, порівняно з синхронною, є асинхронна машина з короткозамкненим ротором. Зокрема вона в $\approx 1,3-1,4$ рази легша від аналогічної синхронної машини, наявність ковзання короткозамкнутого ротора щодо поля статора зумовлює велику стійкість паралельної роботи асинхронного генератора (АГ), а безконтактне виконання – більший ККД. Крім цього краща форма генерованої напруги, надійність при дії короткого замикання – переваги, які створюють перспективи для широкого використання АГ з короткозамкненим ротором. На сьогодні, створено і апробовано велику кількість схем, які забезпечують регульоване подання реактивної потужності, необхідної для збудження і роботи АГ, а також для стабілізації напруги на його затискачах в автономному режимі роботи [1, 2]. Проте складність протікання процесів самозбудження АГ, наявність нелінійного процесу намагнічування заліза машини, ковзання між магнітними полями статора і ротора не дозволяють отримати прості рівняння генератора, як об'єкта керування.

Особливий інтерес становить розробка і дослідження однофазного автономного джерела змінного струму невеликої потужності на базі трифазної асинхронної машини. Це зумовлено:

- відсутністю однофазних асинхронних машин потужністю більше 1 кВт;
- можливістю використання для таких цілей серійних трифазних асинхронних двигунів;
- відсутністю методики розрахунку та вибору параметрів такого джерела.

Проектування однофазного автономного джерела на базі трифазної АМ вимагає правильного вибору ємності самозбудження та вибору раціональної схеми регулювання напруги на затискачах. Розв'язання таких задач на сучасному рівні можливе лише за допомогою створення математичних моделей і їх комп'ютерних досліджень. Такий метод

дослідження нами вже використаний для трифазного автономного джерела на базі асинхронної машини з самозбудженням [4].

Модель однофазного автономного джерела на базі трифазної АМ нами створена, використовуючи теорію моделювання електромеханічних систем з напівпровідниковими перетворювачами [3]. При цьому прийняті такі допущення: повітряний проміжок асинхронної машини гладкий і рівномірний; обмотка статора розташована симетрично; обмотки статора мають однакові постійні параметри; механічні втрати і втрати в сталі не враховуються. Порівняно з відомими моделями [1, 2] ця теорія при створенні моделі дозволяє враховувати дискретність напівпровідникових перетворювачів, насиченість магнітопроводів електричних машин і апаратів, несиметрію фазних напруг.

Крім цього розроблена математична модель є універсальною, тому що дає змогу досліджувати джерела як трифазного, так і однофазного струму, а також різні способи стабілізації напруги АГ з самозбудженням.

На рис. 1 показана блок-схема модельованої системи автономного джерела на базі трифазного асинхронного генератора з самозбудженням. Для перевірки працездатності моделі як об'єкт досліджень вибрано трифазну асинхронну машину потужністю 11 КВт з ємнісним збудженням, дослідження якої в трифазному режимі описано в [4]. В однофазному джерелі, як найбільш раціональний, застосовано компенсаційний спосіб регулювання напруги. На вході регулятора напруги (РН) відбувається порівняння заданого значення напруги на виході джерела ($U_{з.н.}$) і дійсного значення напруги на виході джерела з давача напруги (ДН). Підтримування напруги на затискачах на заданому рівні відбувається за рахунок регулювання кута відкриття тирсторного компенсатора (ТК) з $R_K L_K$ -навантаженням [4].

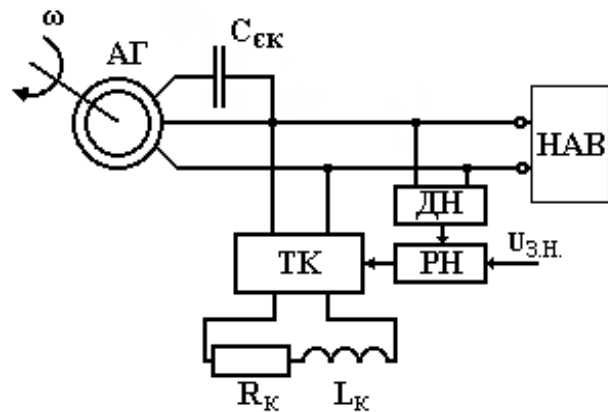


Рис. 1 Блок-схема однофазного автономного джерела на базі трифазного асинхронного генератора з самозбудженням

Згідно з [3] структурні схеми елементів моделі представляються як з'єднання окремих багатополіусників. Кожний електричний багатополіусник описується вузловим зовнішнім рівнянням

$$\begin{aligned}
 p\vec{i}_{АГ} + \vec{G}_{АГ}\vec{\varphi}_{АГ} + \vec{C}_{АГ} &= 0; \\
 p\vec{i}_{НАВ} + \vec{G}_{ЕК}\vec{\varphi}_{ЕК} + \vec{C}_{ЕК} &= 0; \\
 p\vec{i}_{НАВ} + \vec{G}_{НАВ}\vec{\varphi}_{НАВ} + \vec{C}_{НАВ} &= 0; \\
 p\vec{i}_{ТК} + \vec{G}_{ТК}\vec{\varphi}_{ТК} + \vec{C}_{ТК} &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де для відповідного елемента АГ-асинхронний генератор, ЕК – ємнісний компенсатор, НАВ – навантаження, ТК – тирсторний компенсатор), \vec{i}_j – вектор струмів зовнішніх гілок елемента, $\vec{\varphi}_j$ – вектор потенціалів зовнішніх вузлів елемента, \vec{G}_j – матриця коефіцієнтів перед потенціалами, \vec{C}_j – вектор вільних членів, а $p = d/dt$ – оператор диференціювання за часом.

Електричні багатополосники з'єднуються між собою у вузлах системи. Зв'язок між потенціалами зовнішніх вузлів кожного елемента-багатополосника і потенціалами незалежних вузлів системи встановлюється за допомогою матриці під'єднання, яка описує математичну схему під'єднання зовнішніх гілок кожного структурного елемента до незалежних вузлів системи.

Розв'язком системи диференціальних вузлових зовнішніх рівнянь вигляду (1) для кожного структурного елемента є числове значення вектора $\vec{y} = (\vec{i}_1, \vec{i}_2, \dots, \vec{i}_m)$ на кожному кроці інтегрування. Алгоритм визначення цього вектора наведений в [4].

Диференціальні рівняння генератора для миттєвих значень струмів і потокозчеплень у фазах статора АГ [1] можна представити у такому вигляді:

$$\vec{U} = r\vec{\psi} + R_s\vec{I}, \quad (2)$$

де \vec{U} – вектор напруг фаз статора; \vec{I} – вектор струмів фаз статора, $\vec{\psi}$ – вектор потокозчеплень фаз статора, R_s – активний опір фаз статора.

Вектор потокозчеплень фаз статора, згідно з рівнянням (2), можна визначити за виразом

$$\vec{\psi} = \int_0^t (\vec{U} - R_s\vec{I}) dt. \quad (3)$$

За виразом (3) можна знайти складові потокозчеплення в координатах (α, β) , відповідно

$$\begin{aligned} \psi_\alpha &= \frac{2}{3}(\psi_A \cos(0) + \psi_B \cos(-\rho) + \psi_C \cos(\rho)); \\ \psi_\beta &= \frac{2}{3}(\psi_A \sin(0) + \psi_B \sin(-\rho) + \psi_C \sin(\rho)). \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді результуюче потокозчеплення визначається за виразом

$$\psi = \sqrt{(\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2)}. \quad (5)$$

Проведені комп'ютерні дослідження характерних режимів роботи машини, зокрема режимів: самозбудження, стабілізації напруги при самозбудженні, накиду навантаження.

На рис. 2 показані часові діаграми миттєвого значення вихідної напруги АГ в режимі самозбудження: при обертанні АГ з синхронною швидкістю в момент часу $t = 0$ відбувається підмикання ємності $C_{ЕК}$.

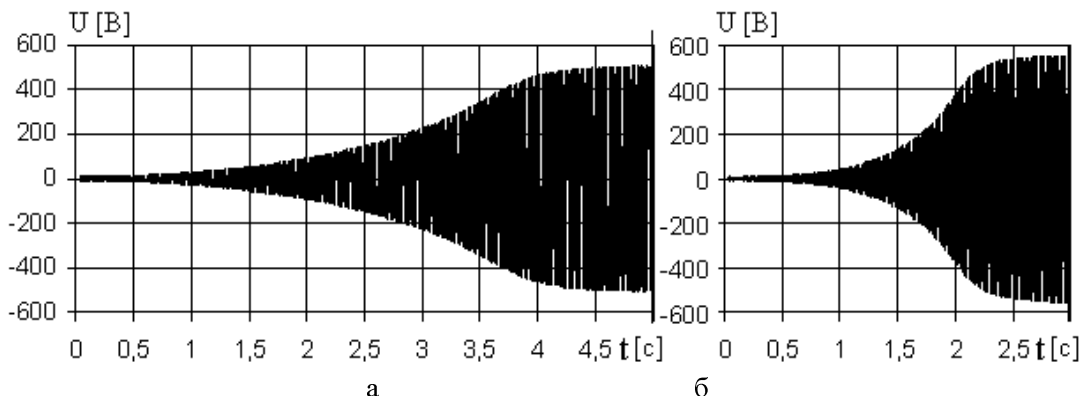


Рис. 2. Діаграми миттєвого значення вихідної напруги АГ в режимі самозбудження при зміні ємності $C_{ЕК}$:
а – $C_{ЕК} = 155 \text{ мкФ}$; б – $C_{ЕК} = 175 \text{ мкФ}$

Модель дає можливість вибрати раціональний режим самозбудження за швидкодією, а також напругою на виході АГ. Крім цього за допомогою цієї моделі можна дослідити характер обертового поля в повітряному проміжку для різних режимів роботи АМ. На рис. 3 зображені діаграми відносних значень поточкозчеплень у координатах α, β ($\Psi_{\alpha}^* = \Psi_{\alpha} / \Psi_H$, $\Psi_{\beta}^* = \Psi_{\beta} / \Psi_H$) в режимі самозбудження при різних значеннях ємності.

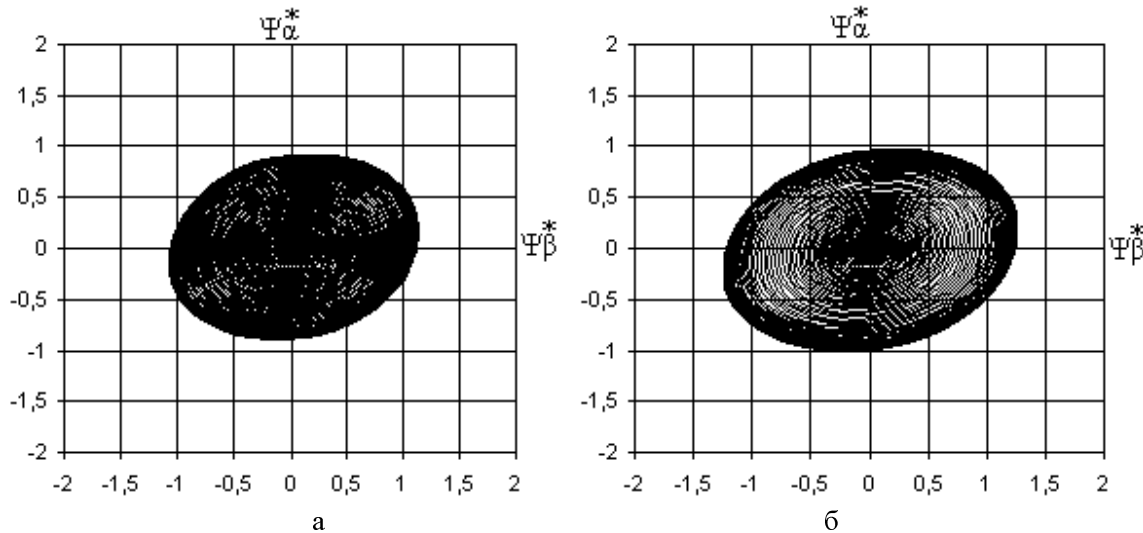


Рис. 3. Діаграми відносних значень поточкозчеплень у координатах α, β при різних значеннях ємності $C_{ек}$:
а – $C_{ек} = 155 \text{ мкФ}$; б – $C_{ек} = 175 \text{ мкФ}$

Аналіз даних діаграм дозволяє оцінити степінь насичення АГ, вибрати значення $C_{ек}$ з умови максимального наближення діаграми до колової, яка властива для АГ в трифазному режимі.

На рис. 4 зображено діаграми роботи автономного джерела в режимі самозбудження з регулятором напруги компенсаційного типу і стрибкоподібного накиду активно-індуктивного навантаження на його виході в момент часу $t = 1,2 \text{ с}$. На діаграмах зображено:

а) миттєві значення вихідної напруги на затискачах джерела з регулятором напруги і її огинаючу ($U_{ог}$);

б) миттєві значення струму в колі навантаження;

в) миттєві значення струму в колі навантаження тиристорного компенсатора;

г) форму миттєвого значення вихідної напруги автономного джерела в режимі відсутності навантаження $t_1 = 1,1 \text{ с}$, а також в режимі з навантаженням $t_2 = 1,3 \text{ с}$.

Наростання напруги на затискачах джерела під час самозбудження відбувається майже без перерегулювання. Час перехідного процесу близько $0,8 \text{ с}$. На вихід автономного джерела ввімкнено активно-індуктивне навантаження в момент часу $1,2 \text{ с}$, потужність якого приблизно дорівнює $4,4 \text{ КВА}$ і $\cos\phi = 0,8$. У діаграмі вихідної напруги джерела помітне динамічне просідання напруги на значення приблизно 5% (рис 2, а), що зумовлено динамічним спадом струму через тиристорний компенсатор до нуля (рис. 2, в). При цьому час перехідного процесу становить $0,05 \text{ с}$. На рис. 4, з показані миттєві значення напруги на виході автономного джерела в режимах:

– без навантаження ($t = 1,1 - 1,15 \text{ с}$);

– з навантаженням ($t = 1,3 - 1,34 \text{ с}$).

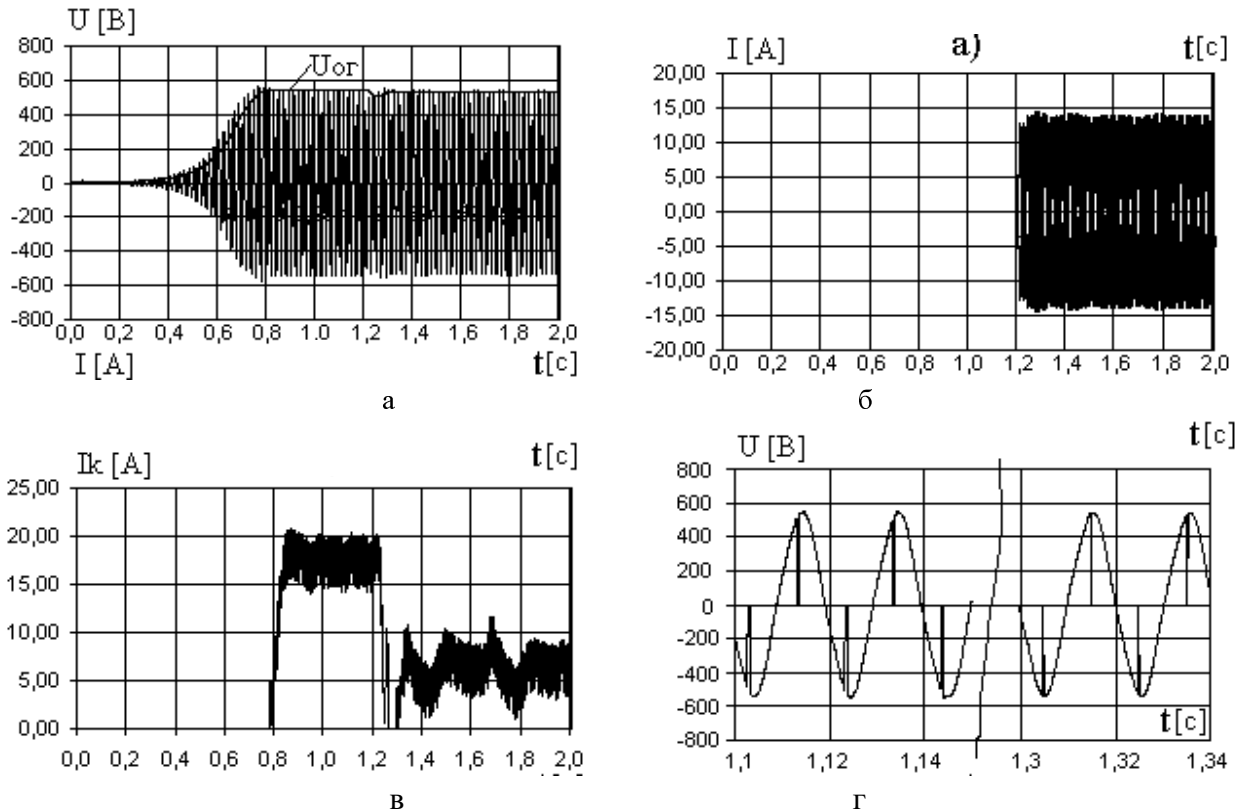


Рис. 4. Діаграми роботи автономного джерела в режимі самозбудження з регулятором напруги компенсаційного типу і стрибкоподібного накиду активно-індуктивного навантаження в момент часу $t=1,2$ с.

При цьому змінюється значення як кута комутації, так і кута відкриття ТК.

Висновки. 1. Розроблена математична модель забезпечує високий ступінь адекватності досліджень в різних режимах роботи. Її можна застосувати для дослідження інших однофазних автономних джерел на базі асинхронного генератора з самозбудженням..

2. Модель дає змогу оптимізувати параметри силової схеми автономного джерела, а також вибрати структуру і параметри регулятора системи керування, забезпечивши при цьому бажані динамічні і статичні характеристики.

1. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. – М., 1998. 2. Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – К.; Одесса, 1990. 3. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно – вентиляционных систем. – Львов, 1986. – 164 с. 4. Куцик А.С., Копчак Б.Л. Дослідження автономного асинхронного генератора з тиристорним регулятором напруги методом математичного моделювання. Технічні вісті. Орган Українського інженерного товариства у Львові. – 2000/1(10), 2(11). – С. 23–27.