

УДК 621.313.333: 621.314.54: 621.316.765

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ВНУТРІШНЬОЮ ЄМНІСНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ

*А. Герман, ст. викладач  
Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Одним із перспективних напрямів створення й розвитку автономних систем електроживлення (АСЕЖ) є розробка автономних генераторів з використанням явища внутрішньої ємнісної компенсації [2].

Режими роботи автономних джерел електроживлення характеризуються різкозмінюваним навантаженням і вимагають застосовувати спеціалізоване обладнання [5]. Особливо це стосується випадків, коли від автономного джерела здійснюється прямий пуск асинхронних короткозамкнених двигунів сумірної потужності. Значні пускові струми впливають на зменшення напруги на шинах автономного джерела і без прийняття спеціальних заходів усталена робота увімкнених паралельно з асинхронними двигунами сумірної потужності споживачів стає неможливою, а електродвигуни, що вмикаються, розганяються досить повільно або й зовсім не розганяються. Традиційне обрання завищеної потужності автономних джерел електроживлення, що забезпечує успішний запуск асинхронних двигунів, неминуче призводить до зростання їх масогабаритних показників, надлишкових капітальних затрат, а також затрат на експлуатацію.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні засади створення АСЕЖ з ємнісною системою збудження запропоновано [2]. Великомасштабний обсяг роботи в плані математичного моделювання АСЕЖ на базі асинхронізованого генератора виконано в [1]. Для математичного моделювання як базова була використана теорія математичного моделювання електромашинно-вентильних систем [3], за допомогою якої можна здійснювати на високому рівні моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів. Суть теорії полягає у використанні методу вузлових потенціалів і дає змогу побудувати математичну модель асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією за модульним принципом, що істотно підвищує ефективність роботи як під час розроблення математичної моделі, так і для її програмної реалізації.

**Постановка завдання.** Завдання дослідження полягає в розробці математичної моделі асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією (рис. 1) та на її підґрунті алгоритму і відповідного програмного комплексу, який дасть змогу за допомогою комп'ютерів досліджувати електромагнітні процеси, що відбуваються в автономній системі електроживлення.

**Виклад основного матеріалу.** Завдання полягає в розробці математичної моделі системи за схемою: „Асинхронний генератор з внутрішньою ємнісною

компенсацією – активно-індуктивне навантаження”, яка складається з асинхронної машини АМ, обмотка якої розділена на дві частини компенсуючою ємністю; активно-індуктивного навантаження Н.

Літерами  $\varphi$ ,  $i$ ,  $C$  позначено відповідно потенціали незалежних вузлів, струми гілок схеми та ємність. У нижньому індексі цифрами при потенціалах  $\varphi$  позначено номери незалежних вузлів, а при струмах  $i$  – номери гілок у межах відповідного структурного елемента.

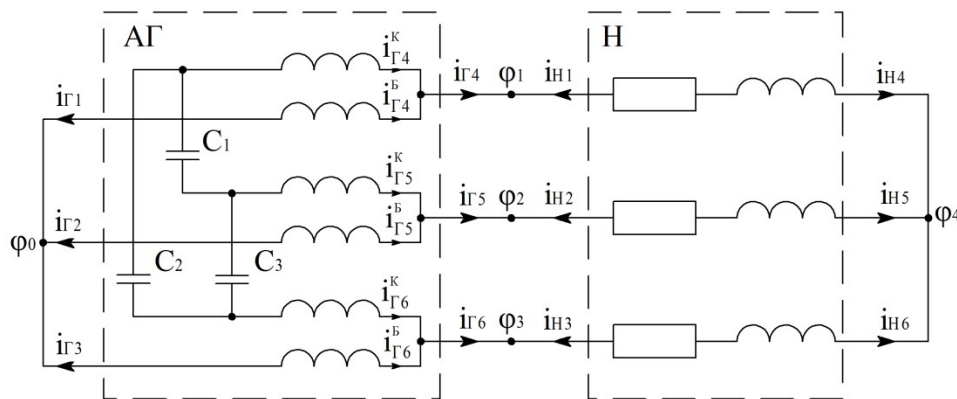


Рис. 1. Схема асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією.

*Математичні моделі асинхронного генератора.* Математична модель розроблена на базі таких вихідних допущень [3], які дають змогу розробити математичну модель асинхронної машини, яка з достатньою для практики точністю відображає перебіг електромагнітних та електромеханічних процесів.

Отже, математичною моделлю асинхронної машини слугує система диференціальних рівнянь електричного і механічного стану. Першу групу рівнянь формуємо на базі рівнянь Кірхгофа, а механічний стан опишемо рівнянням Даламбера. Згідно з [1; 3; 4; 6] електромагнітні процеси, які відбуваються в асинхронному генераторі (АГ), опишемо диференціальними рівняннями електричного стану. У матричній формі ці рівняння мають такий вигляд:

$$p i_r + G_r \cdot \varphi_r + T_r = 0, \quad (1)$$

де  $i_r$  – вектор струмів зовнішніх гілок;

$\varphi_r$  – вектор потенціалів зовнішніх вузлів;

$G_r, T_r$  – матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів.

Структура матриці коефіцієнтів та вектора вільних членів описана в [1; 3].

Диференціальні рівняння електричного та механічного стану повною мірою описують електромагнітні та електромеханічні процеси, які відбуваються в асинхронних машинах. Ці моделі дають змогу моделювати поведінку асинхронних машин як структурних елементів довільних систем.

Математична модель активно-індуктивного навантаження. Рівняння електричного стану. Враховуючи модульний принцип побудови математичних моделей електротехнічних комплексів і систем, електричний стан статичного навантаження згідно з [1; 3; 5] опишемо зовнішнім рівнянням, яке має такий вигляд:

$$p i_H + G_H \cdot \varphi_H + T_H = 0, \quad (2)$$

де

$$i_H = (i_{H1}, i_{H2}, i_{H3}, i_{H4}, i_{H5}, i_{H6}) \quad (3)$$

– вектор зовнішніх струмів;

$$\varphi_H = (\varphi_{H1}, \varphi_{H2}, \varphi_{H3}, \varphi_{H4}) \quad (4)$$

– вектор потенціалів вузлів;

$G_H, T_H$  – матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів, структура яких докладно описана [1].

Повна система рівнянь електричного стану записується в базисі потенціалів незалежних вузлів і має такий вигляд:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (5)$$

де

$$A = \sum_{j=\Gamma}^{\Pi} \Pi_j G_j \Pi_j^t \quad B = \sum_{j=\Gamma}^{\Pi} \Pi_j^t T_j \quad (6)$$

– матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів відповідно;

$$\varphi = (\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) \quad (7)$$

– вектор потенціалів незалежних вузлів схеми, а  $\Pi_j, G_j, T_j, \Pi_j^t$  – матриця інциденції, матриця коефіцієнтів, вектор вільних членів та матриця, транспонована до  $\Pi_j$  для  $j$ -го структурного елемента схеми ( $j=\Gamma, \Pi$ ).

Кількість рядків матриць інциденції структурних елементів дорівнює кількості незалежних вузлів схеми силового електричного кола (7), а кількість стовпчиків кожної з цих матриць дорівнює кількості зовнішніх гілок відповідних структурних елементів системи. Числові значення елементів матриць інциденції дорівнюють одиниці або нулю. Матриці інциденції структурних елементів відображають топологію схеми силового електричного кола системи. Якщо  $k$ -та зовнішня гілка  $j$ -го структурного елемента входить до  $m$ -го вузла, то елемент відповідної матриці інциденції, який розміщений на перетині  $m$ -го рядка та  $k$ -го стовпчика, дорівнює одиниці. Якщо ж такого зв'язку не існує, то цей елемент дорівнює нулю.

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів полягає в тому, що вхідні дані поділимо на дві групи. До першої з них віднесемо  $C, L_{\Gamma}$ , – ємність, індуктивність фазних гілок, а також аналогічні величини активно-індуктивного навантаження:  $L_H, R_H$  – індуктивність та активний опір.

До другої групи вхідних даних віднесемо початкові умови, об'єднані у вектор інтегрованих змінних  $V$ , який є водночас результатом інтегрування системи диференціальних рівнянь.

На підставі алгоритму розроблено програмний код мовою програмування FORTRAN.

З метою дослідження електромагнітних процесів, дослідної системи та з метою перевірки працездатності програмного комплексу проведено розрахунок електромагнітних процесів, що в ній відбуваються.

На рис. 2 зображена залежність 3-фазної напруги  $u_{\Gamma}$  асинхронного генератора з внутрішньою компенсацією від часу. Як бачимо (рис. 2), крива  $u_{\Gamma}$  відображає обвідні контури модульованої напруги і має частоту ковзання.

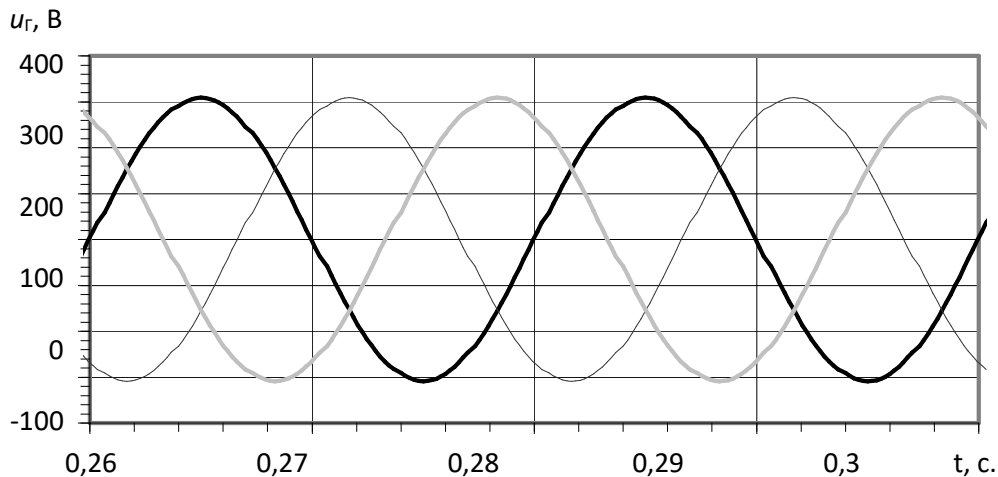


Рис. 2. Залежність напруги асинхронного генератора з внутрішньою компенсацією від часу.

**Висновки.** На підставі прийнятих вихідних допущень, розроблено математичну модель асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією за модульним принципом.

Програмний комплекс, розроблений на підставі алгоритму, отриманого на підґрунті математичної моделі, дає змогу за допомогою персонального комп'ютера проводити всебічні дослідження електромагнітних і електромагнітних процесів, які відбуваються в автономному асинхронному генераторі з внутрішньою ємнісною компенсацією.

### Бібліографічний список

1. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03. Київ, 2010. 398 с.
2. Мішин В. І., Чуєнко Р. М., Макаревич С. С. Сумісна робота різнорідних асинхронних машин в автономному електромеханічному комплексі. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2012. № 49. С. 49-60.
3. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. Львов : Высш. шк., 1986. 164 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины. Ленинград : Энергия, 1974. 840 с.
5. Herman A. Mathematical modeling of asynchronous generators with an active-inductive load. *Motrol*. 2017. Vol. 19, No. 1. P. 71-74.
6. Василів К. М., Герман А. Ф., Левонюк В. Р. Математичне моделювання електромагнітних процесів стартер-генератора електроенергетичної установки на базі газокompресорної станції. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2014. №18. С. 301-310.
7. Гречин Д. П., Герман А. Ф., Дробот І. М. Континуальна математична модель електромагнітного поля асинхронної машини із зубчатим феромагнітним ротором. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 34-41.

#### **Герман А. Математичне моделювання асинхронного генератора з внутрішньою ємнісною компенсацією**

Об'єкт дослідження – асинхронний генератор з внутрішньою компенсацією як електромеханічний перетворювач енергії. За модульним принципом, який передбачає використання методу вузлових потенціалів, розроблена його математична модель, на підставі якої написаний відповідний програмний комплекс. Це дало змогу за допомогою персонального комп'ютера провести моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в асинхронному генераторі.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, ємнісне збудження, математична модель, електрична мережа, алгоритм.

#### **Herman A. Mathematical modeling of an asynchronous generator with internal capacitive compensation**

Object of study – asynchronous generator with internal compensation, as an electromechanical energy converter. According to the modular principle, which involves the use of the method of nodal potentials, its mathematical model is developed, on the basis of which the corresponding software complex is written. This enabled using a personal computer to simulate the electromagnetic processes occurring in the asynchronous generator.

**Key words:** asynchronous generator, capacitive excitation, mathematical model, electric network, algorithm.

**Герман А. Математическое моделирование асинхронного генератора с внутренней емкостной компенсацией**

Объект исследования – асинхронный генератор с внутренней компенсацией, в качестве электромеханического преобразователя энергии. По модульному принципу, который предусматривает использование метода узловых потенциалов, разработана его математическая модель, на основании которой написан соответствующий программный комплекс. Это позволило с помощью персонального компьютера провести моделирование электромагнитных процессов, которые происходят в асинхронном генераторе.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, емкостное возбуждение, математическая модель, электрическая сеть, алгоритм.