

## **МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ШЕСТИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Відомо, що асинхронні генератори з конденсаторним збудженням знаходять широке застосування, зокрема на електростанціях відновлювальної енергетики. За постійної частоти обертання, наприклад на гідроелектростанціях, можна використовувати класичну модель асинхронної машини з конденсаторним самозбудженням. Обмотки статора цієї машини включаються паралельно з батареєю конденсаторів.*

*Математичне моделювання на обчислювальній машині зводиться до числового розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують досліджуваній об'єкт/. Як результат отримують залежності координат об'єкта, які цікавлять дослідника, у перехідних і усталених режимах його роботи, в функції часу або інших координат об'єкта. Формується повний математичний опис об'єкта: нелінійна залежність взаємної індуктивності від струму намагнічування, система лінійних рівнянь для визначення струмів через потокозчеплення та індуктивності.*

*Використання сучасних програмних продуктів візуального блокового імітаційного моделювання для науково-технічних розрахунків в електротехніці і електроенергетиці, таких як MATLAB і його пакети розширення Simulink і SimPowerSystems, істотно підвищує ефективність досліджень за наявності відповідних стандартних блоків. Існуючий стандартний блок Asynchronous Machine з бібліотеки Machines пакета розширення SimPowerSystems не дозволяє повною мірою досліджувати процес конденсаторного самозбудження. Це пов'язано з тим, що з підключенням до стандартного блока Asynchronous Machine конденсаторів збудження і активізації опції Simulate saturation машину не вдається перевести в режим конденсаторного самозбудження. Також виводи обмоток в цьому блоці недоступні. Слід зазначити, що з відключеною опцією Simulate saturation самозбудження настає, але за відсутності нелінійності амплітуда коливань прямує до нескінченності, що є неприйнятним.*

*Запропоновано математичну модель шестифазної асинхронної машини в режимі генератора. Виконано моделювання в середовищі Matlab Simulink та отримано значення напруги генератора за розрахункової потужності джерела реактивного струму. Перехід в генераторний режим відбувається у відповідності до розрахункового значення реактивної потужності конденсаторної батареї.*

**Ключові слова:** асинхронний генератор, шестифазна обмотка, модель Matlab Simulink, система рівнянь, генераторний режим.

### **Вступ**

Стандартний блок Asynchronous Machine бібліотеки SimPowerSystems суттєво обмежений за функціональністю для моделювання генераторного режиму. Зокрема неможливо задати схему з'єднання та необхідну кількість обмоток через відсутність безпосереднього доступу до виводів кожної обмотки. Крім того, в цьому блоці відсутня можливість переходу до необхідного режиму роботи машини за різних характеристик навантаження. В [1] запропоновано метод встановлення взаємодії блоків математичних операцій та блоків бібліотеки SimPowerSystems. Це дозволяє побудувати математичну модель з необхідними параметрами обмоток та виконати моделювання режимів роботи машини в електричній схемі. Крім того, в [2]—[5], [7] розглядаються особливості моделювання асинхронних машин як в нерухомих, так і в обертових системах координат. Проте в цих джерелах розглядаються лише трифазні машини.

У цій роботі запропоновано математичну модель шестифазної асинхронної машини, яка працює в режимі генератора. Виконано моделювання в середовищі Matlab Simulink та отримано зна-

чення напруги генератора за розрахункової потужності джерела реактивного струму.

Метою роботи є побудова математичної моделі шестифазного асинхронного генератора та перевірка її робоздатності в середовищі Matlab Simulink.

### Результати досліджень

Виходячи з рекомендацій, викладених у [5], зобразимо схему заміщення асинхронної машини, що включає в себе основні елементи кіл статора  $x_s$ ,  $r_s$  та ротора  $x_r$ ,  $r_r$ , а також напрямки струмів  $I_s$ ,  $I_r$ , що протікають в обмотках та напругу на затискачах обмотки статора  $U_s$  (рис. 1).

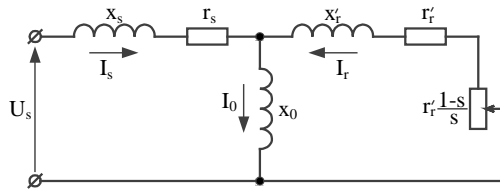


Рис. 1. Схема заміщення АМ

На основі цієї схеми заміщення складемо систему рівнянь для знаходження основних величин [2]. Враховуючи те, що система рівнянь складатиметься не для трифазної системи А, В, С, а для шестифазної, то відповідні фази позначимо як А1, А2, В1, В2, С1, С2.

$$\begin{cases} U_{A1} = i_{A1}r_{A1} + \frac{d\Psi_{A1}}{dt}; \\ U_{A2} = i_{A2}r_{A2} + \frac{d\Psi_{A2}}{dt}; \\ U_{B1} = i_{B1}r_{B1} + \frac{d\Psi_{B1}}{dt}; \\ U_{B2} = i_{B2}r_{B2} + \frac{d\Psi_{B2}}{dt}; \\ U_{C1} = i_{C1}r_{C1} + \frac{d\Psi_{C1}}{dt}; \\ U_{C2} = i_{C2}r_{C2} + \frac{d\Psi_{C2}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\Psi$  — потокозчеплення кожної з обмоток;  $r$  — активний опір;  $i$  — струм обмотки.

Для короткозамкнутого ротора система рівнянь матиме подібний вигляд, але з урахуванням того, що напруга в колі ротора дорівнює нулю.

$$\begin{cases} 0 = i_{a1}r_{a1} + \frac{d\Psi_{a1}}{dt}; \\ 0 = i_{a2}r_{a2} + \frac{d\Psi_{a2}}{dt}; \\ 0 = i_{b1}r_{b1} + \frac{d\Psi_{b1}}{dt}; \\ 0 = i_{b2}r_{b2} + \frac{d\Psi_{b2}}{dt}; \\ 0 = i_{c1}r_{c1} + \frac{d\Psi_{c1}}{dt}; \\ 0 = i_{c2}r_{c2} + \frac{d\Psi_{c2}}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Враховуючи велику кількість подібних рівнянь в системі, є необхідність переходу до матричної форми запису. Відповідно, кожна величина системи рівнянь буде записуватися як масив певної розмірності.

Кожна обмотка статора машини взаємодіє як з іншими обмотками статора, так і з відповідними обмотками ротора. Тому значення потокозчеплень з системи (1) можна виразити в матричній формі як суму добутків взаємоіндуктивностей обмоток машини та струмів статора й ротора [3].

$$[\Psi] = [L_{ss}][i_s] + [L_{sr}][i_r], \quad (3)$$

де  $[L_{ss}]$  — матриця індуктивностей обмоток статора;  $[L_{sr}]$  — матриця взаємодуктивностей обмоток статора та ротора;  $[i_s][i_r]$  — матриці струмів обмоток відповідно статора та ротора;

Для шестифазної машини матриці індуктивностей матимуть розмірність  $6 \times 6$ . Наприклад, для фази A1 відповідний рядок матриці складатиметься з:  $L_{A1}; L_{A1A2}; L_{A1B1}; L_{A1B2}; L_{A1C1}; L_{A1C2}$ . Для інших фаз елементи матриці розташовуються таким чином, щоб враховувалися всі значення взаємодуктивностей обмоток залежно від їхнього розташування. Складемо матрицю взаємодуктивностей для всіх обмоток статора:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{A1} & L_{A1A2} & L_{A1B1} & L_{A1B2} & L_{A1C1} & L_{A1C2} \\ L_{A2A1} & L_{A2} & L_{A2B1} & L_{A2B2} & L_{A2C1} & L_{A2C2} \\ L_{B1A1} & L_{B1A2} & L_{B1} & L_{B1B2} & L_{B1C1} & L_{B1C2} \\ L_{B2A1} & L_{B2A2} & L_{B2B1} & L_{B2} & L_{B2C1} & L_{B2C2} \\ L_{C1A1} & L_{C1A2} & L_{C1B1} & L_{C1B2} & L_{C1} & L_{C1C2} \\ L_{C2A1} & L_{C2A2} & L_{C2B1} & L_{C2B2} & L_{C2C1} & L_{C2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для спрощення розрахунків припустимо, що всі обмотки машини симетричні, отже індуктивності можна вважати приблизно рівними. В такому випадку індуктивності обмоток прирівняємо та виразимо через загальні коефіцієнти [3]:

$$L_{A1} = L_{A2} = L_{B1} = L_{B2} = L_{C1} = L_{C2} = L_h + L_\sigma, \quad (5)$$

де  $L_h$  — взаємна індуктивність між фазами;  $L_\sigma$  — індуктивність розсіювання;

$$L_h = \frac{4\mu_0 \tau l_\sigma (w_s k_{os})^2}{z_p \pi^2 \delta k_\delta}, \quad (6)$$

де,  $k_{os}$  — обмотковий коефіцієнт;  $w_s$  — число витків;  $\mu_0$  — магнітна проникність;  $l_\sigma$  — розрахункова довжина магнітопроводу;  $\delta$  — ширина зазору;  $z_p$  — число пар полюсів.

Враховуючи просторове розміщення обмоток, коефіцієнт взаємної індуктивності матиме різні значення для кожної обмотки. Тому необхідно врахувати косинус кута просторового зсуву осей обмоток. Наприклад, в трифазній системі для фази A [4]

$$\begin{cases} L_{AB} = L_h \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_h; \\ L_{AC} = L_h \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_h. \end{cases} \quad (7)$$

Відповідно для шестифазної системи розрахуємо взаємодуктивності таким чином:

$$\begin{cases} L_{A1A2} = L_h \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}L_h; \\ L_{A1B1} = L_h \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_h; \\ L_{A1B2} = L_h \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2}L_h; \\ L_{A1C1} = L_h \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_h; \\ L_{A1C2} = L_h \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Для спрощення запису винесемо  $L_h$  як окремий коефіцієнт, а косинуси кутів обчислимо та винесемо в окрему матрицю  $[M_h]$ . Для кожної обмотки потрібно крім коефіцієнта взаємної індукти-

вності також врахувати індуктивність розсіювання  $L_{\sigma}$ . Для цього помножимо  $L_{\sigma}$  на одиничну матрицю  $[D_{\sigma}]$  розмірністю  $6 \times 6$ . В результаті будуть враховані індуктивність розсіювання кожної обмотки та взаємні індуктивності між обмотками. В матричній формі рівняння індуктивностей обмоток статора матиме вигляд

$$[L_{ss}] = L_h [M_h] + L_{\sigma} [D_{\sigma}], \quad (9)$$

де  $[M_h]$  — матриця коефіцієнтів;  $[D_{\sigma}]$  — одинична матриця;

$$[M_h] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Крім взаємні індуктивностей між обмотками статора, необхідно також врахувати взаємні індуктивності між обмотками статора та ротора  $L_{sr}$ . Цю величину також можна виразити через коефіцієнт  $L_h$ . Значення  $L_{sr}$  буде змінюватися залежно від кута повороту ротора відносно статора. Цей кут визначається так [3]:

$$\theta = \theta_0 + \int \omega_r dt = z_p (\theta_0 + \int \omega dt). \quad (11)$$

Подібно (8) визначимо взаємні індуктивності між обмотками статора та ротора для фази A1 шестифазної машини:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{A1a1} = L_h \cos(\theta); \\ L_{A1a2} = L_h \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right); \\ L_{A1b1} = L_h \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right); \\ L_{A1b2} = L_h \cos\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right); \\ L_{A1c1} = L_h \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right); \\ L_{A1c2} = L_h \cos\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right). \end{array} \right. \quad (12)$$

Об'єднаємо значення косинусів в окремий масив  $[M_{\theta}]$  та помножимо на коефіцієнт  $L_h$ . Рівняння взаємні індуктивностей між обмотками статора та ротора запишемо у матричному вигляді

$$[L_{sr}] = L_h [M_{\theta}], \quad (13)$$

де  $[M_{\theta}]$  — матриця косинусів;  $L_h$  — взаємна індуктивність між фазами;

$$[M_\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{7\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{3\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

На основі запропонованих рівнянь складемо SPS-модель в середовищі Matlab Simulink (рис. 2).

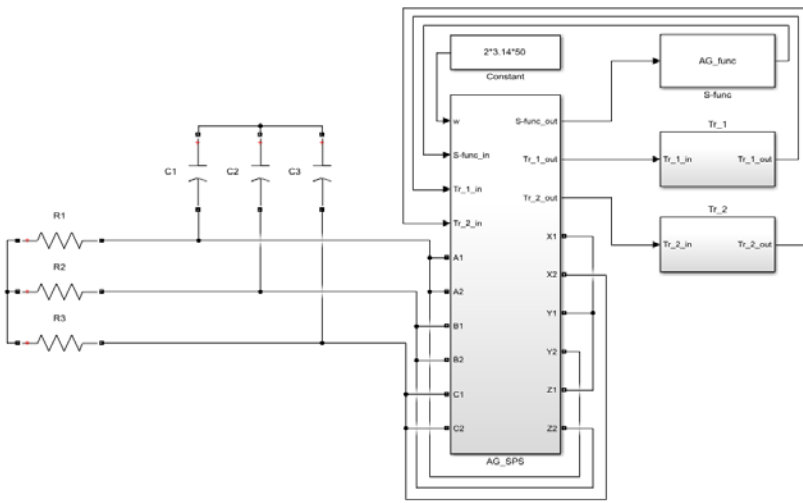


Рис. 2. Структурна схема моделі АГ

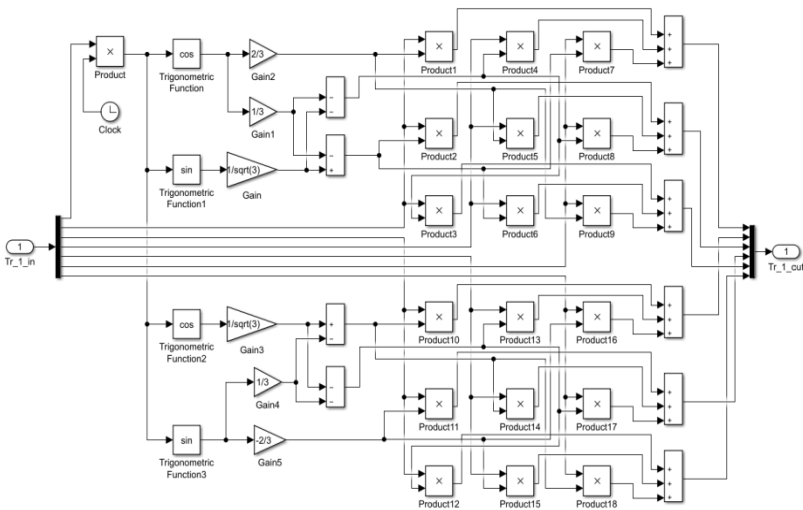


Рис. 3. Структурна схема блока перетворення координат

режимі машини подвійного живлення швидкість обертання ротора збільшується вдвічі.

Моделювання виконано на основі параметрів асинхронної машини АИР100L2, паспортні дані якої наведено в таблиці 1 [6]. Зважаючи на те, що ця машина трифазна, а модель передбачає шість фаз, виконано розщеплення обмоток машини та перерахунок параметрів схеми заміщення за спе-

Системи рівнянь (1), (2) реалізовані за допомогою блока AG\_func, перехід від нерухокої системи координат до обертової [5], [7] здійснюється за допомогою блока Tr\_1, структурна схема якого показана на рис. 3, а зворотне перетворення здійснюється за допомогою блока Tr\_2. Кутова швидкість обертання ротора машини задається блоком Constant.

Показана на рис. 3 схема виконана за допомогою стандартних блоків бібліотеки Simulink. Для взаємодії з блоками бібліотеки SimPowerSystems та перетворення S-моделі в SPS-модель використаємо керовані джерела струму зі зворотним зв'язком через вимірювальні блоки для кожної з фаз. Ця методика детально описана в [1]. Блок AG\_SPS, показаний на рис. 4, об'єднує сигнали обчислювальних блоків та забезпечує взаємодію з силовими електротехнічними компонентами.

Запропонована модель дозволяє працювати як з машинами з короткозамкнутим ротором, так і з фазним ротором. Для перемикання режимів достатньо виконати перекомутацію джерел струму. Також під час роботи в

ціальною методикою, яка в цій роботі не розглядається.

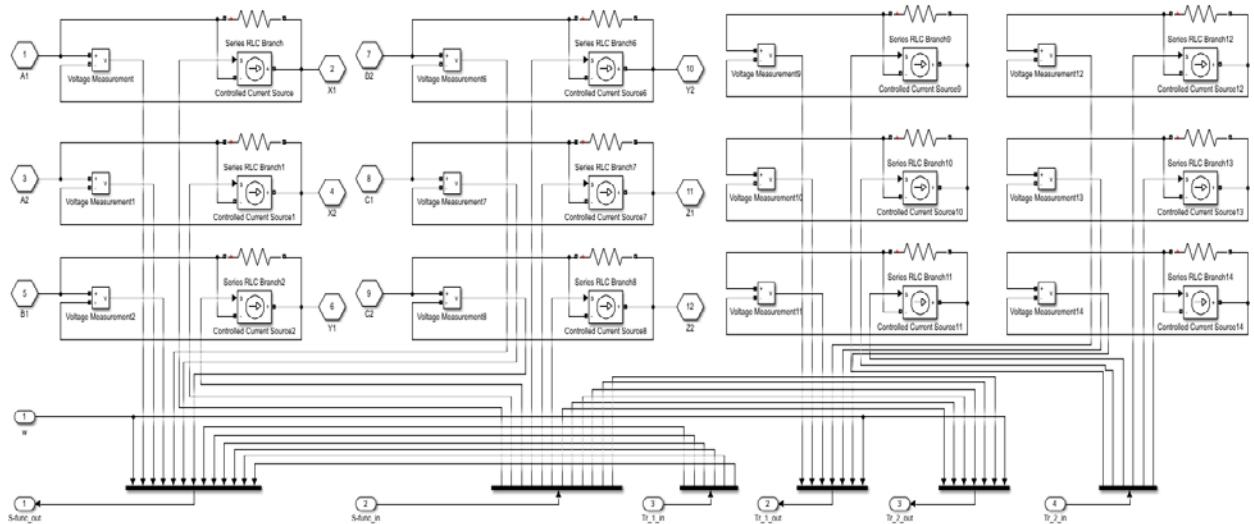


Рис. 4. Структурна схема блока AG\_SPS

Таблиця 1

**Паспортні дані машини**

$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$2p$	$\cos \varphi_n$	$n_n$ , об/хв	$\eta_n$ , %
5,5	220/380	2	0,88	2900	87,5

Розрахункові значення елементів схеми заміщення машини наведено в таблиці 2, для роботи з трифазним навантаженням виводи обмоток з'єднані за схемою, показаною на рис. 2.

Таблиця 2

**Розрахункові значення елементів схеми заміщення**

$I_0$ , А	$x_0$ , Ом	$R_1$ , Ом	$x_1$ , Ом	$R'_2$ , Ом	$x'_2$ , Ом
4,6	31,22	0,98	1,2	0,96	2,51

Для переходу в генераторний режим асинхронна машина потребує додаткового джерела реактивної потужності. Для цього розрахуємо необхідну ємність батареї конденсаторів [8]. Реактивна потужність генератора розраховується за виразом

$$Q_G = Q_0 + q_1 + q_2, \tag{15}$$

де  $Q_0$  — реактивна потужність, необхідна для створення основного магнітного поля;  $q_1$  — реактивна потужність розсіювання обмотки статора;  $q_2$  — реактивна потужність розсіювання обмотки ротора;

$$Q_0 = m I_0^2 x_0. \tag{16}$$

$Q_0 = 3 \cdot 6,4^2 \cdot 31,22 = 3836$  вар;  $I_0$  — струм вітки намагнічування;  $x_0$  — реактивний опір вітки намагнічування;

$$q_1 = m I_1^2 x_1. \tag{17}$$

$q_1 = 3 \cdot 11,6^2 \cdot 1,2 = 484,4$  вар;  $I_1$  — струм статора;  $x_1$  — реактивний опір статора;

$$q_2 = m I_2'^2 x_2'; \tag{18}$$

$q_2 = 3 \cdot 11,1^2 \cdot 2,51 = 927,7$  вар;  $I_2'$  — приведений струм ротора;  $x_2'$  — приведений реактивний опір ротора.

Враховуючи (16)—(18), повна реактивна потужність машини становить

$$Q_G = 3836 + 484,4 + 927,7 = 5248 \text{ вар.}$$

Навантаження генератора дорівнює номінальному та складається з набору резистивних елемен-

тів  $R1—R3$  (див. рис. 2). Необхідна реактивна потужність батареї конденсаторів  $Q_B$  буде дорівнювати реактивній потужності генератора

$$Q_B = Q_G. \quad (19)$$

Струм фази батареї конденсаторів визначається за виразом [8]:

$$I_K = \frac{Q_B}{m U_\phi}; \quad (20)$$

$$I_K = \frac{5248}{3 \cdot 220} = 7,9 \text{ А}.$$

Розрахункова ємність батареї конденсаторів обчислюється за формулою

$$C_B = \frac{3 I_K \cdot 10^6}{\omega U_\phi}; \quad (21)$$

$$C_B = \frac{3 \cdot 7,9 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 343,1 \text{ мкФ}.$$

За розрахунковими даними виконано моделювання, результат якого показано на рис. 5. Осцилограма відображає процес поступового зростання лінійної напруги генератора до значення, що відповідає номінальному. Спостерігається також аперіодична складова, характерна для режиму м'якого самозбудження машини.

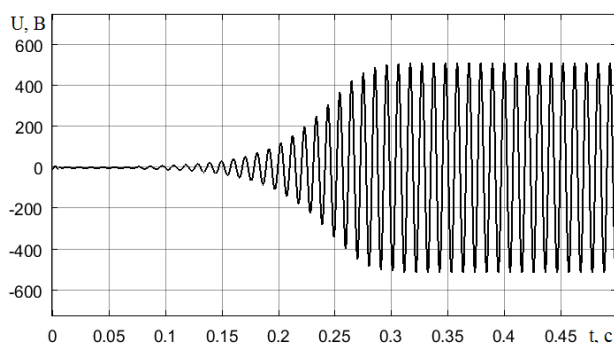


Рис. 5. Осцилограма напруги АГ

## Висновки

Виконано моделювання асинхронної машини з шестифазною обмоткою статора. Роботоздатність математичної моделі перевірена в середовищі Matlab Simulink. Перехід машини в генераторний режим відбувається у відповідності до розрахункових значень ємності батареї конденсаторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] И. В. Черных, *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink*. Москва, Россия: ДМК Пресс; СПб., Россия: Питер, 2008, 288 с.
- [2] О. І. Толочко, Г. С. Чекавський, та О. В. Пісковатська, *Моделювання систем електроприводу змінного струму*. Донецьк, Україна: ДонНТУ, 2005, 92 с.
- [3] О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, та О. В. Садовой, *Моделювання електромеханічних систем*, Кременчук, Україна, 2001, 376 с.
- [4] А. А. Усольцев, *Векторное управление асинхронными двигателями*. СПб, Россия: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 43 с.
- [5] И. П. Копылов, *Математическое моделирование электрических машин*. Москва, Россия: Высш. шк., 2001, 327 с.
- [6] И. П. Копылов, и Б. К. Клоков, *Справочник по электрическим машинам: в 2 томах. Т 1*. Москва: Энергоатомиздат, 1988, 456 с.
- [7] А.-З. Р. Джендубаев, Р. Ю. Барахоев, З. А.-З. Джендубаев, «Моделирование асинхронного генератора и машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением,» *Электричество : теорет. и научно-практ. журн.*, № 7, с. 46-51, 2013.
- [8] Н. Д. Торопцев. *Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок*, Москва, Россия : НТФ Энергопрогресс, 2004, 88 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.11.2017

**Михайлюк Олег Борисович** — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: olegmm12@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

## Simulation of Electric Part of Six-Phase Ag in Matlab Simulink Environment

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

It is known that asynchronous generators with capacitor excitation are widely used, especially in renewable energy power plants. With a constant frequency of rotation, for example, at hydroelectric power stations, you can use the classic model of an asynchronous machine with capacitor self-excitation. Stator windings of this machine are connected in parallel with the battery of the capacitors.

Mathematical modeling on a computer is reduced to a numerical solution of the system of differential equations describing the investigated object, resulting in the dependence of the coordinates of the object that are of interest to the researcher in the transitional and steady modes of its operation, in the function of time or other coordinates. As a result, a complete mathematical description of the object is formed: the nonlinear dependence of the mutual inductance on the current of magnetization, a system of linear equations for the determination of currents through flow coupling and inductance.

The use of modern software visual block simulation for scientific and technical calculations in electrical engineering and power engineering, such as MATLAB and its expansion packets Simulink and SimPowerSystems, significantly increases the efficiency of research in the presence of appropriate standard blocks. The existing standard Asynchronous Machine unit from the Machines library of the SimPowerSystems expansion pack does not allow full investigation of the process of capacitor self-excitation. This is due to the fact that when connecting to the Asynchronous Machine's standard unit of excitation and activating the Simulate saturation option, the machine cannot be converted to capacitor self-excitation mode. Also, the outputs of the windings in this block are not available. It should be noted that when the Simulate saturation option is turned off, self-excitation occurs, but in the absence of nonlinearity, the amplitude of oscillations goes to infinity, which is unacceptable.

In this paper a mathematical model of a six-phase asynchronous machine in the generator mode is proposed. The simulation was performed in Matlab Simulink environment and the value of the generator voltage at the calculated power of the reactive source was obtained. The transition to the generator mode is in accordance with the calculated value of the reactive power of the capacitor battery.

**Keywords:** asynchronous generator, six-phase winding, model Matlab Simulink, system of equations, generator mode.

**Mykhailiuk Oleh B.** — Post-Graduate Student the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Systems, e-mail: olegmm12@gmail.com

## Моделирование электрической части шестифазного асинхронного генератора в среде MATLAB SIMULINK

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

Известно, что асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением находят широкое применение, в том числе на электростанциях возобновляемой энергетики. При постоянной частоте вращения, например на гидроэлектростанциях, можно использовать классическую модель асинхронной машины с конденсаторным самовозбуждением. Обмотки статора этой машины включаются параллельно с батареей конденсаторов.

Математическое моделирование на вычислительной машине сводится к численному решению системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый объект. В результате получают зависимости координат объекта, которые интересуют исследователя, в переходных и установившихся режимах его работы, в функции времени или других координат объекта. Формируется полное математическое описание объекта: нелинейная зависимость взаимной индуктивности от тока намагничивания, система линейных уравнений для определения токов через потокосцепления и индуктивности.

Использование современных программных продуктов визуального блочного имитационного моделирования для научно-технических расчетов в электротехнике и электроэнергетике, таких как MATLAB и его пакеты расширения Simulink и SimPowerSystems, существенно повышает эффективность исследований при наличии соответствующих стандартных блоков. Существующий стандартный блок Asynchronous Machine из библиотеки Machines пакета расширения SimPowerSystems не позволяет в полной мере исследовать процесс конденсаторного самовозбуждения. Это связано с тем, что при подключении к стандартному блоку Asynchronous Machine конденсаторов возбуждения и активизации опции Simulate saturation машину не удается перевести в режим конденсаторного самовозбуждения. Также выводы обмоток в этом блоке недоступны. Следует отметить, что в случае отключенной опции Simulate saturation самовозбуждение наступает, но при отсутствии нелинейности амплитуда колебаний стремится к бесконечности, что является неприемлемым.

Предложена математическая модель шестифазной асинхронной машины в режиме генератора. Выполнено моделирование в среде Matlab Simulink и получено значение напряжения генератора при расчетной мощности источника реактивного тока. Переход в генераторный режим происходит в соответствии с расчетным значением реактивной мощности конденсаторной батареи.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, шестифазная обмотка, модель Matlab Simulink, система уравнений, генераторный режим.

**Михайлюк Олег Борисович** — аспирант кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: olegmm12@gmail.com