

## РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА АМПЛІТУДИ НАПРУГИ В АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРАХ ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

Пушкар М. В., Тригуб А. О., Романенко С. В.

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

Представлено аналітичні вирази, які дозволяють створити алгоритми керування амплітудою та частотою генерованої напруги асинхронного генератора. За допомогою цих аналітичних виразів побудовано тривимірні графіки залежності амплітуди та частоти генерованої напруги від навантаження та ємності конденсаторної батареї, отримані залежності було верифіковано експериментально.

**Постановка проблеми.** Асинхронні генератори з самозбудженням (АГ) останнім часом набувають широкого поширення в автономних системах генерування електричної енергії для агропромислових комплексів. Такі генератори є доволі дешевими і надійними, але керування їх напругою та частотою є складною задачею, адже ці параметри залежать від навантаження АГ та ємності конденсаторної батареї для його збудження.

В свою чергу аналітичних залежностей, які б описували взаємозв'язок між цими чотирма параметрами АГ не існувало, що ускладнювало процедуру аналізу та синтезу систем керування вихідною напругою таких АГ. Тому в даній статті пропонується розглянути аналітичні вирази, які описують цей взаємозв'язок з метою побудови тривимірних залежностей параметрів АГ, які будуть корисними при створенні систем керування генераторами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] представлено математичну модель, та основні аналітичні залежності АГ.

На основі цих виразів в роботах [2,3] була розвинута ця тема та отримано ряд формул, які можуть бути корисними при створенні систем керування напругою АГ. З іншого боку існують підходи, які базуються на ітераційному обчисленні робочої точки АГ [4,5], але необхідність врахування нелінійності кривої намагнічування в них нехтується, що зменшує точність та якість керування напругою АГ при використанні таких методів [6,7].

**Мета статті.** Встановлення аналітичних залежностей між амплітудою та частотою напруги АГ та навантаженням і ємністю конденсаторної батареї, а також їх експериментальна верифікація.

**Основні матеріали дослідження.** Двофазна математична модель АГ з резистивним навантаженням та конденсаторами, розміщеними паралельно обмотці статора, представлена в довільній обертовій системі координат F-G, із врахуванням магнітного насичення була представлена в [1, 2]. В результаті аналізу цієї моделі в [3], були виведені аналітичні вирази для частоти та амплітуди генерованої напруги:

$$f_e^* = \frac{C - i_s - Y_L U_s}{2\pi C U_s}, \quad (1)$$

$$|U_s^*| = \frac{2\pi f_e^* L_M i_M^*}{\sqrt{(1 + Y_L R_s - C 2\pi f_e^{*2} L_{\sigma s})^2 + 2\pi f_e^{*2} (Y_L L_{\sigma s} + C R_s)^2}}. \quad (2)$$

де  $C$  – ємність конденсаторної батареї;  
 $i_s$  – струм статора АГ;

$Y_L$  – провідність навантаження АГ;  
 $L_M^*$  – індуктивність намагнічування;  
 $i_M^*$  – струм намагнічування АГ;  
 $R_s$  – опір статора;  
 $L_{\sigma s}$  – індуктивність розсіювання статора.

Для експериментального підтвердження отриманих аналітичних залежностей використовувався лабораторний стенд, оснащений трифазним асинхронним електродвигуном АИРМ63В4У3, з паспортними даними 370 Вт, 380 В, 50 Гц, та 1450 об/хв, який використовувався в якості АГ.

Наступні параметри були визначені експериментально  $R_s = 27$  Ом,  $L_{\sigma s} = 0.08266$  Гн. Для врахування нелінійності кривої намагнічування була прийнята процедура її апроксимації описана в [7].

В якості привідного двигуна, на одному валу з АГ встановлено інший асинхронний електродвигун 4АМ80В3У3, з паспортними даними 2.2 КВт, 380 В, 50 Гц, та 2800 об/хв), швидкість якого регулюється перетворювачем частоти АBB ACS140.

Завищена потужність привідного двигуна відносно АГ та активована в перетворювачі частоти функція компенсації ковзання забезпечують стабілізацію швидкості АГ під час експериментальних досліджень. Конденсатори для самозбудження АГ комутуються трифазними реле в напівавтоматичному режимі за допомогою програмованого логічного реле Lovato Kinco.

Під час виконання експерименту ємності були підключені в трикутник, що дозволяє збільшити ємність батареї втричі, порівняно з підключенням за схемою зірки. Навантаження генератора підключені за схемою зірки. Для збору та обробки експериментальних даних використовувалось програмне забезпечення для моніторингу параметрів перетворювача частоти фірми АBB та пристрій для збору даних в режимі онлайн сумісний з MATLAB.

Розрахункові та експериментальні статичні залежності частоти  $f^* = \omega_e^* / 2\pi$  та амплітуди генерованої напруги від ємності конденсаторної батареї для різних значень швидкостей обертання АГ та навантажень наведені на рисунках 1 та 2, відповідно.

Лініями без маркування представлені розрахункові характеристики, а лінії з маркуванням відповідають результатам експерименту.

З графіків видно, що експериментальні та розрахункові характеристики за значеннями та формою майже збігаються, невелика різниця між ними пояс-

нюються визначенням струму намагнічування АГ за апроксимованою кривою намагнічування [7].

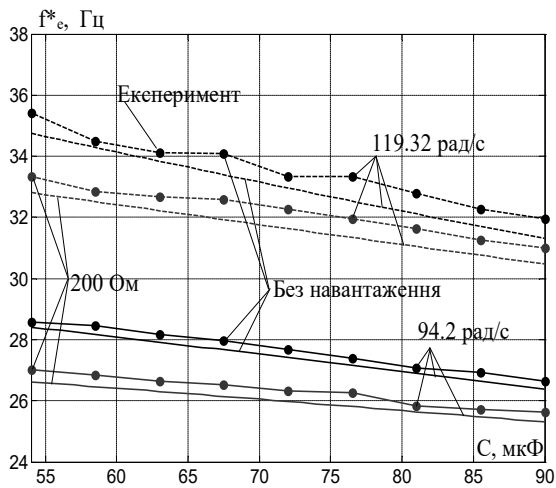


Рисунок 1 – Залежності частоти генерованої напруги

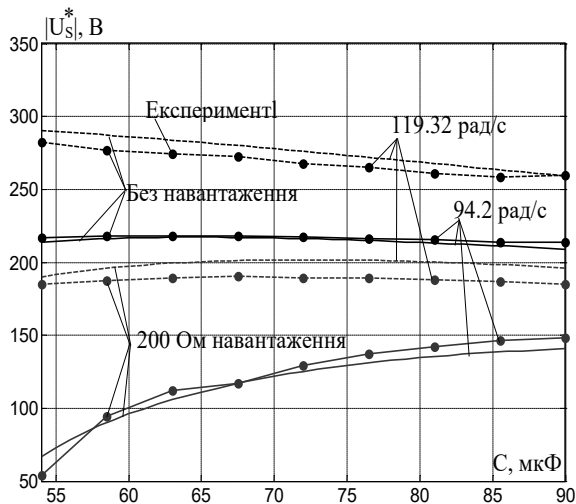


Рисунок 2 – Залежності амплітуди генерованої напруги

На рис. 3 представлено тривимірний графік залежності функції частоти від ємності  $f^*(C)$  для різних значень провідності  $Y_L$ , розрахованих для випадку швидкості обертання АГ 119.32 рад/с. На графіку показана границя самозбудження (крива 1) розрахована за методикою наведеною в [2]. Крива 2 є проекцією кривої 1 на площину  $C-Y_L$ . Крива 3 промаркована зірочками в точках максимального значення частоти. Як видно криві  $f^*(C)$  є монотонними з максимумами в точках  $C = C_{min}$ .

Подібний тривимірний графік амплітуди генерованої напруги представлений на рис. 4.

Слід зауважити, що функція  $|U_S^*(C)$  має максимальні точки всередині границь самозбудження [3]. Максимальне значення функції  $|U_S^*(C, Y_L)$  відповідає випадку  $Y_L = 0$ .

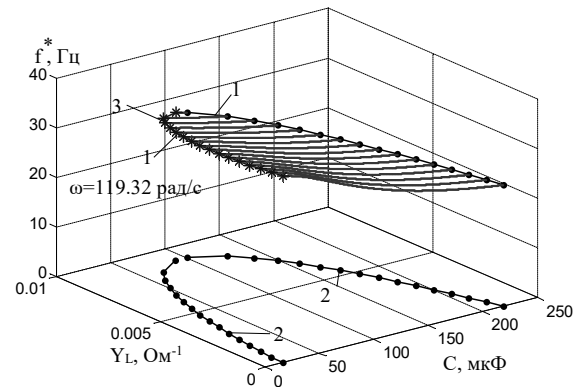


Рисунок 3 – Статичні залежності частоти генерованої напруги від ємності, розраховані в діапазоні зміни провідності навантаження

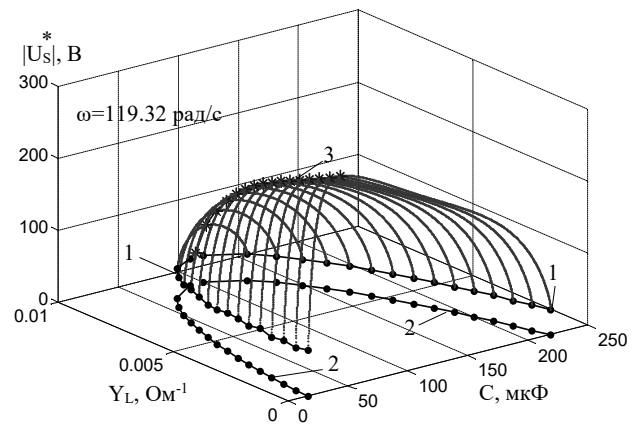


Рисунок 4 – Статичні залежності амплітуди генерованої напруги від ємності, розраховані в діапазоні зміни провідності навантаження

Графік залежності  $f^*(Y_L)$  для різних значень  $C$  розрахованих для випадку 119.32 рад/с (крива 1) та зона самозбудження (крива 2) показані на рис. 5.

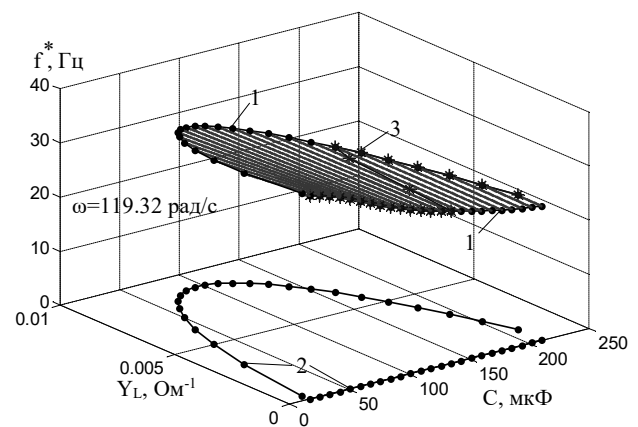


Рисунок 5 – Статичні залежності частоти генерованої напруги від провідності навантаження, розраховані в діапазоні зміни ємності

Крива 3 відповідає максимальним значенням частоти можливим для даного навантаження всередині зони самозбудження.

Тривимірний графік залежності  $|U_s^*|(Y_L)$  розрахований в діапазоні зміни ємності представлений на рисунку 6. Максимальні значення напруги (крива 3) відповідають випадку  $Y_L = 0$ , кола АГ працює без навантаження.

Отримані аналітичні залежності та розраховані за їхньою допомогою тривимірні графіки дозволяють проводити аналіз статичних режимів роботи АГ та розробляти стратегію керування одночасно частотою та амплітудою генерованої напруги. Вони також можуть бути корисними при створенні систем автоматичного керування генерованою напругою.

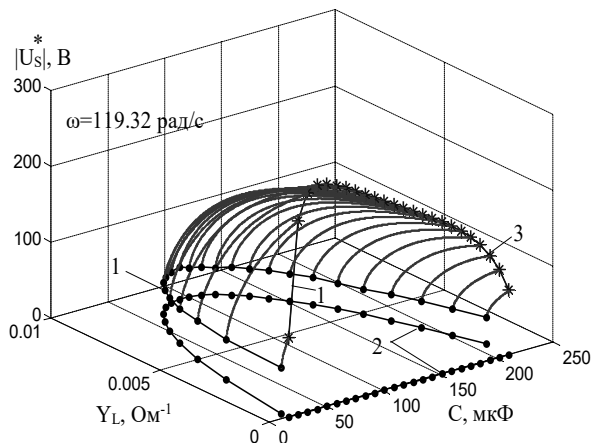


Рисунок 6 – Статичні залежності амплітуди генерованої напруги від провідності навантаження, розраховані в діапазоні зміни ємності

**Висновки.** У результаті проведених досліджень було експериментально верифіковано отримані в попередніх роботах аналітичні залежності для частоти та амплітуди генерованої напруги асинхронного генератора із самозбудженням. Різниця експериментальних даних з отриманими розрахунковим шляхом не перевищує 5 %, що є прийнятним для використання в реальних системах керування напругою генераторів. Цю похибку можна зменшити шляхом використання при розрахунку уточнених даних струму намагнічування та інших методів апроксимації цієї кривої.

Отримані результати доцільно використовувати при проектуванні автоматизованих систем керування напругою асинхронних генераторів, а також для аналізу статичних режимів при розробці нових стратегій одночасного керування амплітудою та частотою їх генерованої напруги.

#### Список використаних джерел

1. Kiselychnyk O., Pushkar M., Bodson M. Critical load of self-excited induction generators. *Electrotechnic and Computer Systems*. №. 03(79), 2011. P. 282-285.
2. Kiselychnyk O., Wang J., Bodson M., Pushkar M. Steady-state and dynamic characteristics of self-excited induction generators with resistive-inductive loads. *Proc. of International Symposium on Power Electronics,*

*Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, Italy, 18-20 June 2014. P.625–630.*

3. Kiselychnyk O., Peresada S., Pechenik M., Pushkar M. The processes of self-excitation in stand-alone compound excited induction generators. *Technical Electrodynamics* 2015(3), January 2015. P. 33-39.

4. Bonert R., Rajakaruna S. Self-excited induction generator with excellent voltage and frequency control. *IEE Proc. - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, 2010, issue 1. P.33-39.

5. Biglari A., Miraftebi S. A. Steady-state analysis and voltage control of self-excited induction generator (SEIG). *Proc. of 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2012)*. P. 776 – 781.

6. Sandeep V., Murthy S. S. and Singh B. A comparative study on approaches to curve fitting of magnetization characteristics for induction generators, 2012. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Bengaluru, 2012. P. 1-6.

7. Method of approximation the magnetizing inductance curves of self-excited induction generators, 2017. / Pushkar M., Krasnoshapka N., Pechenik M. and Bovkunovych V. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kiev, 2017. P. 395-398.

#### Аннотация

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Пушкарь Н. В., Тригуб А. О., Романенко С. В.

Представлены аналитические выражения, которые позволяют создать алгоритмы управления амплитудой и частотой генерированного напряжения асинхронного генератора. С помощью этих аналитических выражений построены трехмерные графики зависимостей амплитуды и частоты генерированного напряжения от нагрузки и емкости конденсаторной батареи. Полученные зависимости были верифицированы экспериментально.

#### Abstract

### CONTROL OF VOLTAGE FREQUENCY AND MAGNITUDE IN STAND-ALONE SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS

M. Pushkar, A. Tryhub, S. Romanenko

In the paper analytical expressions that allow one to create algorithms for controlling the amplitude and frequency of the generated voltage of an asynchronous induction generator are presented. Using these analytical expressions, three-dimensional graphs of the dependences of the amplitude and frequency of the generated voltage on the load and capacitance of the capacitor bank are constructed. The obtained dependences were verified experimentally.