

УДК 621.313.3

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА НАВАНТАЖЕННЯ

М. В. Печеник, В. С. Бовкунович, М. В. Пушкар

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: pushkar.mykola@gmail.com

Розглянуто використання аналітичних залежностей для границь самозбудження та статичних характеристик напруги трифазного автономного асинхронного генератора при розробці систем регулювання його напруги на основі електронного регулятора навантаження. Надано модель системи стабілізації напруги за допомогою електронного регулятора навантаження асинхронного генератора в середовищі MATLAB. Показано, що використання аналітичних залежностей при аналізі генератора дозволяє отримати значення ємностей конденсаторів самозбудження аналітичним шляхом, що може бути широко використане на практиці при розробці подібних систем регулювання напруги асинхронного генератора.

Ключові слова: асинхронний генератор, самозбудження, регулювання напруги, електронний регулятор навантаження.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Серед сучасних автономних систем генерування електричної енергії все більш розповсюдженими стають автономні генераторні установки на основі асинхронних генераторів із самозбудженням (АГ). Зазвичай генератори в таких установках приводяться в обертання дизельними або бензиновими двигунами, система керування якими підтримує постійною частоту обертання вихідного валу приводного двигуна. Це вирішує питання сталості частоти генерованої напруги АГ, але питання стабілізації напруги АГ є все ще актуальним і може бути вирішене багатьма способами. Зазвичай при розробці серійних автономних АГ багато уваги приділяється тому, як зробити систему більш дешевою й простою в обслуговуванні, але надійною та з високими показниками якості генерованої напруги.

Серед сучасних тенденцій на ринку таких систем найбільшого розповсюдження здобули системи з регулюванням напруги АГ за допомогою статичного компенсатора (STATCOM) [1] та з використанням електронного регулятора навантаження [2, 3] (ЕРН). Останній порівняно з першим є більш простим підходом до реалізації надійної та високоефективної системи регулювання напруги АГ, та на відміну від статичного компенсатора є більш дешевим і надійним, адже не містить дорогих елементів, таких як інвертор та система керування ним.

Для розробки таких систем потрібно аналізувати АГ з точки зору режимів самозбудження та статичних режимів роботи, для того щоб підвищити динамічні показники якості генерованої напруги. У [4, 5] були отримані аналітичні залежності, які спрощують цю задачу.

Метою даного дослідження є поширення підходу запропонованого в [4, 5] для розробки системи стабілізації напруги АГ за допомогою електронного регулятора навантаження.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Функціональну схему системи керування напругою АГ за допомогою електронного регулятора навантаження зображено на рис. 1.

АГ приводиться в обертання за допомогою при-

відного двигуна М, швидкість обертання якого підтримується постійною. Для самозбудження АГ використовується паралельна батарея конденсаторів С, включених у трикутник. Генератор підключено до навантаження, яке під час роботи може змінюватись у діапазоні від 0 до 100 % від номінального значення.

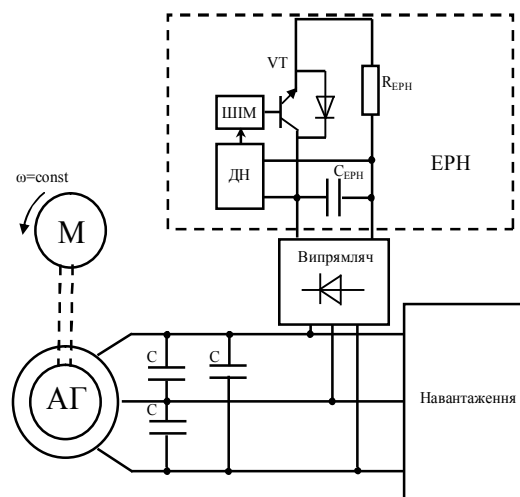


Рисунок 1 – Функціональна схема системи керування напругою за допомогою електронного регулятора навантаження

Паралельно до навантаження та генератора підключається електронний регулятор навантаження, який складається з випрямляча, фільтруючого конденсатора $C_{ЕРН}$ та баластного резистора $R_{ЕРН}$, який залежно від навантаження на АГ комутується за допомогою електронного ключа VT.

Сигнали керування ключем поступають від ШІМ контролера, який залежно від величини напруги, отриманої з датчика напруги ДН, дає сигнал на замикання ключа.

Конденсаторна батарея С у таких системах розраховується так, щоб АГ самозбудився від неї при підключеному номінальному навантаженні.

Завданням електронного регулятора навантаження є підтримка сталого навантаження АГ, що у

свою чергу робить сталою й величину генерованої напруги АГ. У випадку, коли величина навантаження змінюється, підключається баластне навантаження R_{ELC} , так щоб величина загальної потужності на генераторі залишалася незмінною [3]:

$$P_{заг} = P_L + P_{бал}, \quad (1)$$

де $P_{заг}$ – загальна електрична потужність на генераторі; P_L – електрична потужність, яку споживає навантаження, підключене до АГ; $P_{бал}$ – електрична потужність, яку споживає баластний резистор $R_{ЕРН}$. Електрична потужність $P_{бал}$ може бути використана корисно, наприклад, для обігріву, зарядки акумуляторів і. т.п.

Для точного розрахунку ємності конденсаторної батареї необхідно розрахувати границі самозбудження АГ у координатах $C - \omega$ та статичні характеристики напруги АГ, які обчислюються за допомогою виразів, наданих у [4, 5].

Границі самозбудження АГ при роботі з активним навантаженням обчислюються за рівнянням

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left(\omega_e^* - \frac{R_R(1 + Y_L R_S) - \omega_e^{*2} C R_R L_S^*}{\omega_e^* (Y_L (L_S^* L_R^* - L_M^2) + R_S L_R^* C)} \right). \quad (2)$$

Статичні характеристики напруги АГ отримуються за рівнянням

$$|U_S^*| = \frac{\omega_e^* L_M^* i_M^*}{\sqrt{(1 + Y_L R_S - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} + C R_S)^2}}, \quad (3)$$

де U_S – генерована напруга АГ; R_S і R_R – активні опори статора та ротора; n_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість ротора АГ; ω_e – кутова швидкість обертання довільної системи координат F–G; C – ємність конденсаторної батареї; $L_M = f(i_M)$ – індуктивність намагнічування АГ, яка є статичною функцією i_M – амплітуди намагнічуючого струму АГ; $Y_L = 1/R_L$ – величина провідності навантаження; $L_{\sigma S}$ – індуктивність розсіювання статора.

За допомогою рівняння (2) отримуємо діапазон ємностей і швидкостей, за якими самозбудження АГ є можливим (границі самозбудження), і, користуючись рівнянням (3), розраховуємо значення ємності, яка забезпечить бажану величину напруги при заданих швидкості та навантаженні.

Дослідження й розрахунки проводилися для АГ на основі трифазного асинхронного двигуна АИР112М4У3 потужністю 5,5 кВт, номінальною напругою 380 В, частотою 50 Гц, кількістю пар полюсів – 2. Наступні параметри генератора було отримано експериментально: $R_S = 0,94$ Ом; $R_R = 0,7$ Ом; $L_{\sigma S} = L_{\sigma R} = 0,124$ Гн; $L_M = 0,118$ Гн.

Границі самозбудження АГ, отримані за допомогою виразу (2), зображено на рис. 2.

Розрахунки проводились для трьох випадків: роботи без навантаження, при роботі з номінальним навантаженням $R_L = 30$ Ом та при роботі з навантаженням 50 % від номінального $R_L = 60$ Ом.

Виходячи з (3), було розраховано ємність конденсаторної батареї, яка забезпечить величину генерованої напруги 380 В при швидкості обертання валу АГ $\omega = 157$ рад/с та навантаженні $R_L = 30$ Ом, яке відповідає номінальному навантаженню АГ.

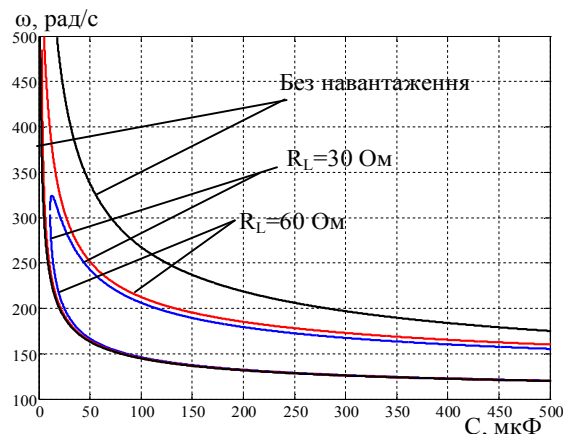


Рисунок 2 – Границі самозбудження АГ АИР112М4У3

Ця ємність становить $C = 153,37$ мкФ, а її значення лежить у діапазоні границь самозбудження даного АГ.

Для дослідження процесів, що відбуваються у системі керування напругою АГ, було проведено математичне моделювання в середовищі MATLAB.

При дослідженні використовувалась наступна послідовність операцій керування:

- під час початкового інтервалу часу 0–0,2 с АГ під навантаженням розганяється до швидкості $\omega = 157$ рад/с;
- на інтервалі часу 0,2–3,4 с АГ самозбуджується та виходить на стає генерування вихідної напруги;
- на інтервалі часу 4–6 с відбувається скидання 50 % навантаження ($R_L = 60$ Ом).

Результати математичного моделювання приведено на рис. 3.

З наданих графіків видно, що після збудження, на інтервалах часу 3,4–4 с та 6–8 с, АГ працює в сталому режимі під повним активним навантаженням ($R_L = 30$ Ом), при цьому значення амплітуди лінійної напруги складає 537 В, а амплітуда фазного струму сягає значення 17,7 А. Разом з тим АГ генерує електромагнітний момент, який складає 34 Нм. Зауважимо, що на даних проміжках часу ЕРН не працює, що видно з графіку струму ключа електронного регулятора навантаження.

На інтервалі часу 4–6 с відбувається зменшення активного навантаження до 50 %. У той же час АГ починає генерувати більшу за амплітудою напругу, але оскільки до АГ підключено ЕРН, то відбувається погашення надлишкової енергії на баластному резисторі електронного регулятора, що видно з графіків струму та напруги в ЕРН, де значення струму через ключ складає 35,8 А, а напруга на конденсаторі лан-

ки постійного струму ЕРН складає 537 В. Водночас момент АГ зменшується до 25,5 Нм, а амплітуда фазного струму зменшується до 17,4 А, у той час як

амплітуда лінійної напруги не перевищує 537 В і залишається сталою на всьому інтервалі часу 3,4–8с.

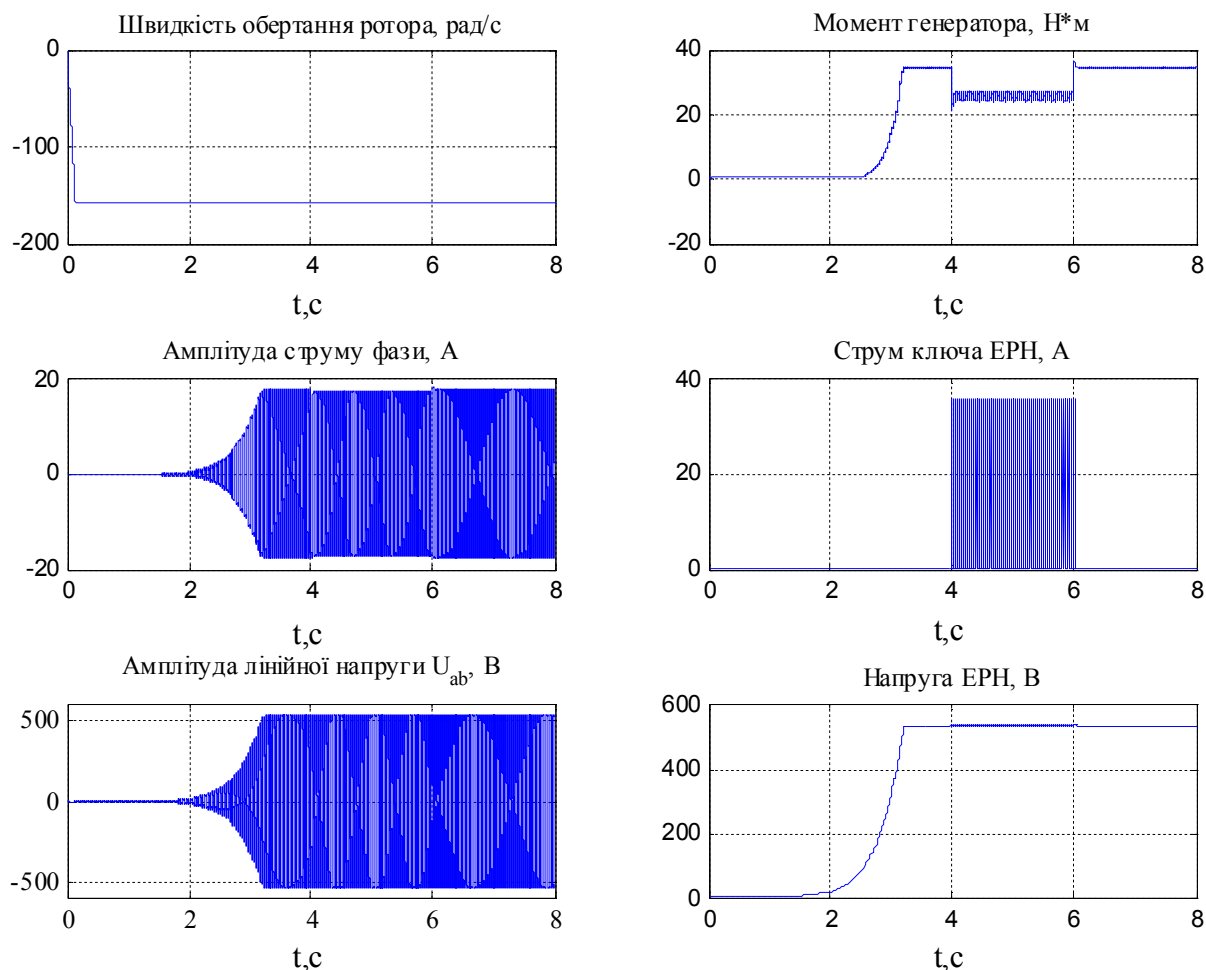


Рисунок 3 – Результати математичного моделювання системи стабілізації напруги АГ

Таким чином, з графіків перехідних процесів встановлюємо, що електронний регулятор навантаження дозволяє стабілізувати вихідну напругу АГ.

ВИСНОВКИ. Вирази для зон самозбудження АГ та статичних характеристик напруги дозволяють проводити аналіз та вибір ємностей для збудження генератора та можуть бути використані на практиці для розробки систем стабілізації напруги АГ за допомогою електронного регулятора навантаження. Створена модель в середовищі MATLAB дозволяє аналізувати роботу системи АГ-ЕРН за різними режимами та видами навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh B., Murthy S.S., Gupta S. Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators // *Energy Conversion*. – Iss. 19/2004 (4). – PP. 783–790.
2. Singh B., Murthy S.S., Gupta S. Analysis and

implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator” // *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*. – Iss. 151/2004 (1). – PP. 51–60.

3. Singh B., Murthy S.S., Gupta S. Transient Analysis of Self-Excited Induction Generator with Electronic Load Controller Supplying Static and Dynamic Loads // *IEEE Transactions on Industrial Applications*. – Iss. 41/2005 (5). – PP. 1194–1204.

4. Bodson M., Kiselychuk O. Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – Iss. 27/2012 (2). – PP. 238–249.

5. Kiselychuk 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, 2014. – PP. 625–630.

**VOLTAGE CONTROL OF SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR
WITH ELECTRONIC LOAD CONTROLLER****M. Pechenyk, V. Bovkunovych, M. Pushkar**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: pushkar.mykola@gmail.com

The implementation of analytical dependencies for self-excitation boundaries and static characteristics of three-phase induction generator for the design of voltage regulating system based on electronic load controller is considered. The MATLAB model of system of induction generator voltage stabilization based on electronic load controller is presented. It is shown that the use of analytical dependencies in the analysis of generator is helpful to get a value of self-excitation capacitors analytically and can be widely used in practice in the design of voltage control systems of induction generator.

Key words: induction generator, self-excitation, voltage control, electronic load controller.

REFERENCES

1. Singh, B., Murthy, S.S. and Gupta, S. (2004), "Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol. 19, no. 4, pp. 783–790.
2. Singh, B., Murthy, S.S. and Gupta, S. (2004), "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, Vol. 151, no. 1, pp. 51–60.
3. Singh, B., Murthy, S.S. and Gupta, S. (2005), "Transient Analysis of Self-Excited Induction Generator with Electronic Load Controller Supplying Static and Dynamic Loads", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 41, no. 5, pp. 1194–1204.
4. Bodson, M. and Kiselychnyk, O. (2012), "Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, no. 2, pp. 238–249.
5. Kiselychnyk, O., Wang, J., Bodson, M. and Pushkar, M. (2014), "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)*, pp. 625–630.