

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, Київ, 03056, Україна. E-mail: pushkar.mykola@gmail.com

Асинхронні генератори із самозбудженням набувають все більшого розповсюдження в автономних системах електропостачання. Але регулювання генерованої напруги асинхронних генераторів та визначення його статичних характеристик є задачею, яка досі базувалася лише на ітераційних підходах. Раніше було запропоновано підходи до розробки систем регулювання напруги асинхронних генераторів, які базуються на аналітичних залежностях. У даній роботі 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 використано на практиці при розробці подібних систем регулювання напруги асинхронного генератора.

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

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ
С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА НАГРУЗКИ**Н. В. Печеник, В. С. Бовкунович, Н. В. Пушкар**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: pushkar.mykola@gmail.com

Асинхронные генераторы с самовозбуждением приобретают все большее распространение в автономных системах электроснабжения. Но регулирование генерируемого напряжения асинхронных генераторов и определение его статических характеристик является задачей, которая до сих пор базировалась только на итерационных подходах. Ранее были предложены подходы к разработке систем регулирования напряжения асинхронных генераторов, основанные на аналитических зависимостях. В данной работе рассмотрено использование аналитических зависимостей для границ самовозбуждения и статических характеристик напряжения трехфазного автономного асинхронного генератора при разработке систем регулирования его напряжения на основе электронного регулятора нагрузки. Представлена модель системы стабилизации напряжения с помощью электронного регулятора нагрузки асинхронного генератора в среде MATLAB. Показано, что использование аналитических зависимостей при анализе генератора позволяет получить значения емкостей конденсаторов самовозбуждения аналитическим путем, что может быть широко использовано на практике при разработке подобных систем регулирования напряжения асинхронного генератора.

Ключевые слова: асинхронный генератор, самовозбуждение, регулирование напряжения, электронный регулятор нагрузки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Тенденція все більшого подорожчання енергоносіїв, які використовуються при виробництві електричної енергії, робить актуальним перехід на альтернативні джерела енергії. А в деяких районах, куди прокладання електричної мережі є нерентабельним та недоцільним, можливим є використання лише автономних систем генерування електричної енергії. Зазвичай такі системи базуються на поєднанні приводного двигуна – вітро-, або гідро- турбіни чи двигуна внутрішнього згоряння та електричного генератора. Від таких систем вимагається низька собівартість, високий ресурс та надійність, великі інтервали обслуговування та низькі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу. Іноді від роботи автономної системи генерування електричної енергії залежить життя людей та можливість зв'язку із зовнішнім світом.

Серед сучасних автономних систем генерування електричної енергії все більш розповсюдженими стають автономні генераторні установки на основі асинхронних генераторів (АГ) із самозбудженням.

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) [1–3] та з використанням електронного регулятора навантаження (ЕРН) [4–6]. 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 надій-

ним, адже не містить дорогих елементів, таких як інвертор і 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 [7–9] були отримані аналітичні залежності, які спрощують цю задачу і, на відміну від існуючих ітераційних методів, є менш громіздкими та більш точними. Також за допомогою аналітичних виразів для статичних характеристик виникає можливість синтезувати алгоритми для систем керування напругою, частою, потужністю [9], навантаженням асинхронних генераторів, що є підґрунтям для подальшої розробки більш складних систем керування параметрами АГ, які базуються на мікропроцесорних пристроях.

Метою даного дослідження є поширення підходу запропонованого в [7–9] 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.

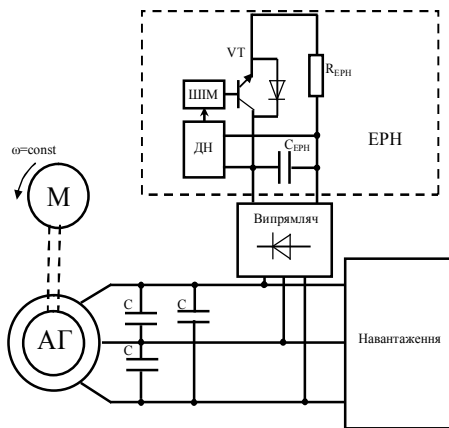


Рисунок 1 – Функціональна схема системи керування напругою за допомогою електронного регулятора навантаження

Асинхронний генератор АГ приводиться в обертання за допомогою привідного 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.

Паралельно до навантаження та генератора підключається електронний регулятор навантаження, який складається з випрямляча, фільтруючого конденсатора СЕРН та баластного резистора RЕРН, 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 роз-

раховується 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.ін.

Для точного розрахунку ємності конденсаторної батареї необхідно розрахувати границі самозбудження АГ у координатах $C - \omega$ та статичні характеристики напруги АГ.

Математична модель асинхронного генератора в довільній системі координат описується наступними чотирма нелінійними диференціальними рівняннями [7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_S}{dt} &= U_S - R_S i_S - \omega_e J \Psi_S; \\ \frac{d\Psi_R}{dt} &= -R_R i_R + (n_p \omega - \omega_e) J \Psi_R, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{де } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \Psi_S = [\Psi_{SF} \quad \Psi_{SG}]^T,$$

$\Psi_R = [\Psi_{RF} \quad \Psi_{RG}]^T$ – вектори потокозчеплень статора й ротора; $i_S = [i_{SF} \quad i_{SG}]^T$, $i_R = [i_{RF} \quad i_{RG}]^T$ – вектори струмів статора й ротора; $U_S = [U_{SF} \quad U_{SG}]^T$ – вектор статорної напруги; 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.

Паралельно до обмоток статора підключаються конденсатори збудження ємністю С та паралельно до них – послідовні з'єднання резисторів R_L та індуктивностей L_L навантаження.

Тоді рівняння для напруги на обмотках статора (на конденсаторах збудження) отримується на основі першого закону Кірхгофа у вигляді

$$-C \frac{dU_S}{dt} = i_S + i_L, \quad (3)$$

де $i_L = [i_{LA} \quad i_{LB}]^T$ – вектор струму навантаження.

Рівняння для кола навантаження АГ отримується за другим законом Кірхгофа:

$$Y_L L_L \frac{di_L}{dt} = Y_L U_S - i_L, \quad (4)$$

де $Y_L = 1/R_L$ – провідність навантаження; L_L – індуктивність навантаження.

У функції вектора стану вибираються координати

$$X = [U_{SA} \ i_{SA} \ i_{RA} \ i_{LA} \ U_{SB} \ i_{SB} \ i_{RB} \ i_{LB}]^T. \quad (5)$$

Тоді, згідно з методикою, наданою в [6, 7], матричне рівняння для опису АГ буде восьмого порядку й запишеться у вигляді

$$E\dot{X} = FX, \quad (6)$$

де

$$E = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_M & L_M & 0 & 0 & L_{MB} & L_{MB} & 0 \\ 0 & L_M & L_{\sigma R} + L_M & 0 & 0 & L_{MB} & L_{MB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_L L_L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{MB} & L_{MB} & 0 & 0 & L_{\sigma S} + L_M & L_M & 0 \\ 0 & L_{MB} & L_{MB} & 0 & 0 & L_M & L_{\sigma R} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_L L_L \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -R_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_R & 0 & 0 & -n_p \omega L_M & -n_p \omega (L_{\sigma R} + L_M) & 0 \\ Y_L & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & n_p \omega L_M & n_p \omega (L_{\sigma R} + L_M) & 0 & 0 & 0 & -R_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_L & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$L_{MA} = L_M + (L - L_M) i_{MA}^2 / i_M^2;$$

$$L_{MB} = L_M + (L - L_M) i_{MB}^2 / i_M^2;$$

$$L_{MAB} = (L - L_M) i_{MA} i_{MB} / i_M^2,$$

де $L_{\sigma S}$, $L_{\sigma R}$ – індуктивності розсіювання статора й ротора; L_M – індуктивність намагнічування; $L = L_M + i_M dL_M / di_M$ – динамічна індуктивність намагнічування; $i_M = \sqrt{i_{MA}^2 + i_{MB}^2}$ – модуль вектора струму намагнічування.

При цьому індуктивність намагнічування описується статичною залежністю $L_M = f(i_M)$ [7] з нелінійними ділянками при малих і великих значеннях i_M . Залишкова намагніченість АГ може симулюватись якимось маленьким початковим значенням однієї з напруг статора (або обох).

Виходячи з наведених вище залежностей, у [7–9] були отримані вирази для амплітуди генерованої напруги та границь самозбудження АГ при роботі з активним та активно-індуктивним навантаженнями:

– для випадку активного навантаження

$$|U_S^*| = \frac{\omega_e^* L_M^* i_M^*}{\sqrt{(1 + Y_L R_S - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} + C R_S)^2}}, \quad (7)$$

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

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left(\omega_e^* - \frac{R_R (1 + Y_L R_S) - \omega_e^{*2} C R_R L_S^*}{\omega_e^* (Y_L (L_S^* L_R^* - L_M^2) + R_S L_R^* C)} \right); \quad (8)$$

– для випадку активно-індуктивного навантаження:

$$|U_S^*| = \frac{\omega_e^* L_M^* i_M^* \sqrt{1 + \omega_e^{*2} Y_L^2 L_L^2}}{\sqrt{D_U}}; \quad (9)$$

$$\omega = \frac{\omega_e^*}{n_p} - \frac{R_R (1 + Y_L R_S) - \omega_e^{*2} C R_R (L_S^* + Y_L R_S L_L)}{n_p \omega_e^* Z_\omega}, \quad (10)$$

$$D_U = (1 + Y_L R_S (1 - C L_L \omega_e^{*2}) - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} (1 - C L_L \omega_e^{*2}) + C R_S + Y_L L_L)^2;$$

$$Z_\omega = Y_L (L_S^* L_R^* - L_M^2) + R_S L_R^* C - Y_L L_L \omega_e^{*2} C (L_S^* L_R^* - L_M^2) + Y_L L_L L_R^*.$$

За допомогою рівнянь (7) та (9) можливо отримати діапазон ємностей і швидкостей, за якими самозбудження АГ є можливим (границі самозбудження), і, користуючись виразами (8) та (10), відповідно розраховуємо значення ємності, яка забезпечить бажану величину напруги при заданих швидкості та навантаженні.

Дослідження проводилися з використанням фізичної моделі АГ, побудованої на базі 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 рівняння (7), зображено на рис. 2.

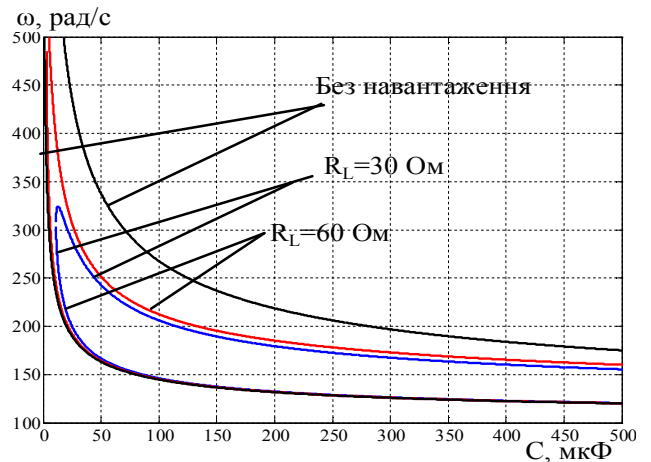


Рисунок 2 – Границі самозбудження АГ АИР112М4У3

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

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

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

Для дослідження процесів, що відбуваються в системі керування напругою АГ, було створено модель, яка надана на рис. 3, та проведено математичне моделювання в середовищі MATLAB.

Параметри ЕРН при цьому були наступними: ємність конденсатора фільтра в ланці постійного струму $C_f = 370 \text{ мкФ}$; опір баластного резистора $R_k = 15 \text{ Ом}$;

частота ШІМ керування ключа ЕРН – 8 кГц.

При дослідженні використовувалась наступна послідовність операцій керування:

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

Результати математичного моделювання приведено на рис. 4.

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 ($R_L = 30 \text{ Ом}$), при цьому значення амплітуди лінійної напруги складає 537 В, а амплітуда фазного струму сягає значення 17,7 А.

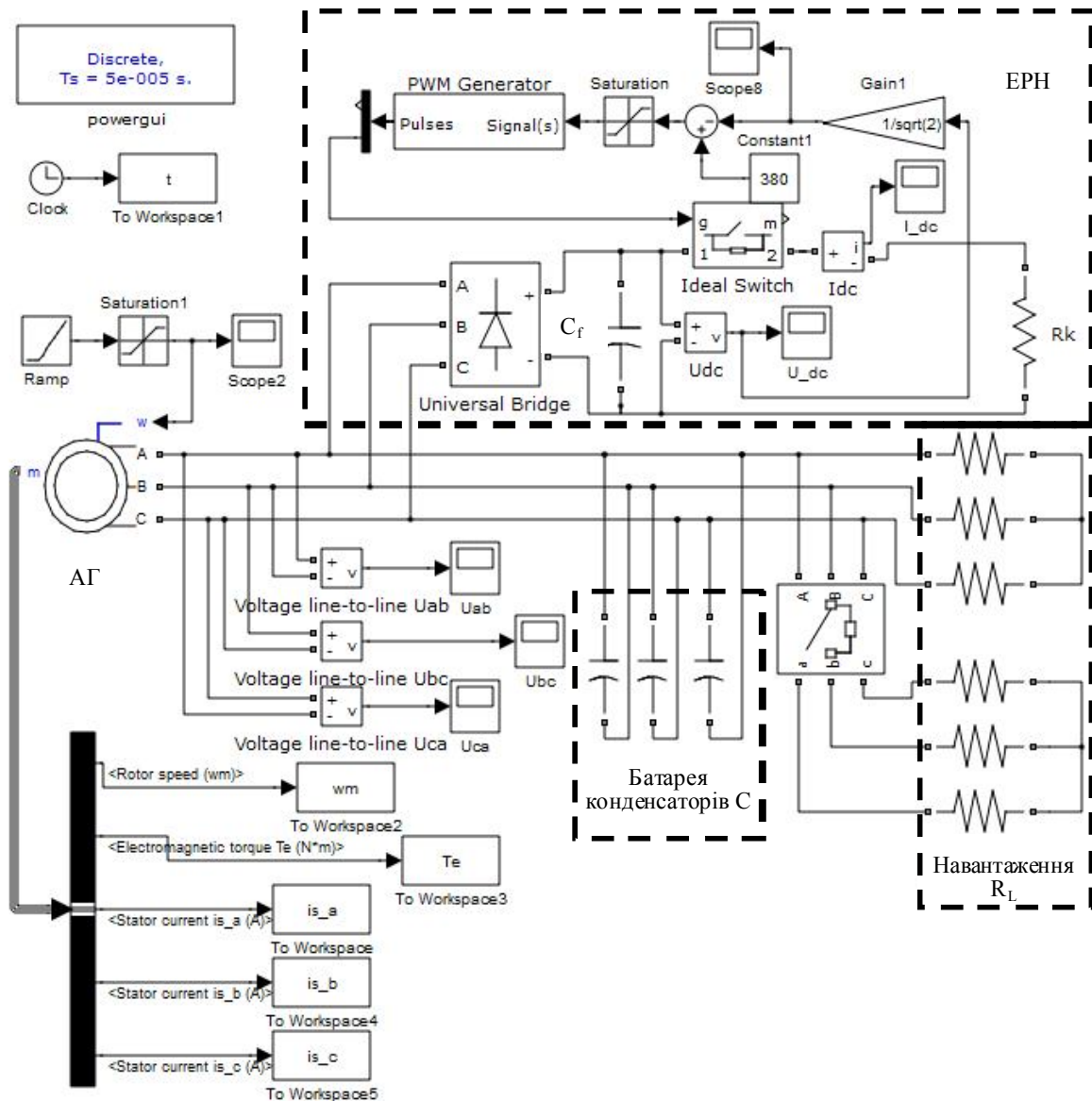


Рисунок 3 – Модель Simulink/MATLAB стабілізації напруги АГ

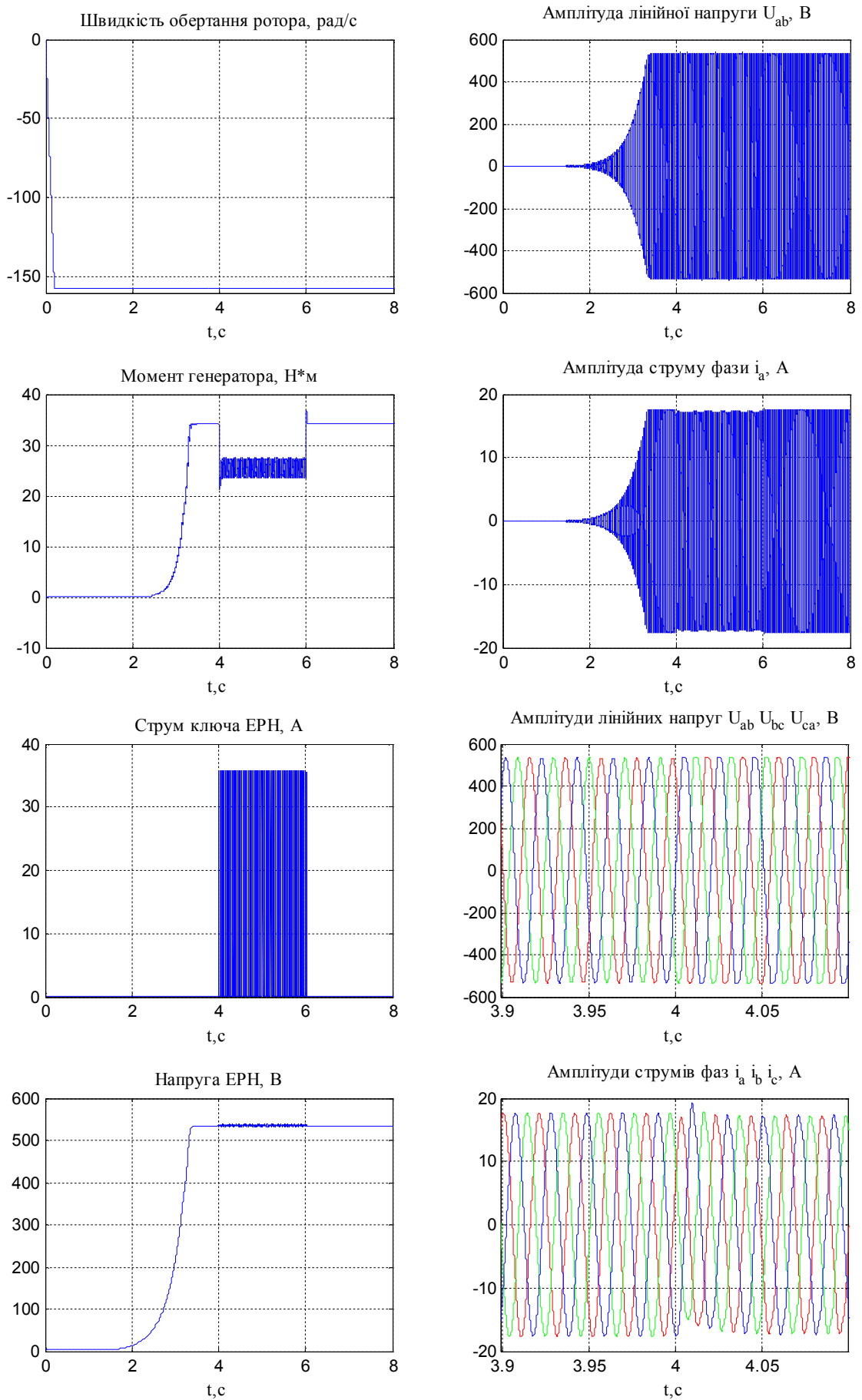


Рисунок 4 – Результати математичного моделювання системи стабілізації напруги АГ

Разом із тим АГ генерує електромагнітний момент, який складає 34 Нм. Зауважимо, що на даних проміжках часу ЕРН не працює, що видно з графіка 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 ланки 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 3,4–8 с.

Таким чином, з графіків перехідних процесів, наданих на рис. 4, 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 у 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, IEEE Transactions on.* – Iss. 19/2004 (4). – PP. 783–790.
2. Youssef K.H., Wahba M.A., Yousef Hasan A., Sebaky O.A. A new method for voltage and frequency control of stand-alone self-excited induction generator using PWM converter with variable DC link voltage

// *Proc. of American Control Conference*, 11–13 June 2008. – PP. 2486–2491.

3. Chen W.-L., Lin Y.-Hs., Gau H.-S., Yu C.-H. STATCOM controls for a self-excited induction generator feeding random loads // *IEEE Trans. Power Delivery.* – Iss. 23/2008 (4). – PP. 2207–2215.

4. 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.

5. Ramirez J.M., Torres E. An electronic load controller for the self-excited induction generator // *IEEE Trans. Energy Conversion.* – Iss. 22/2007 (2). – PP. 546–548.

6. 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.

7. 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.

8. 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).* – 2014. – Italy: Ischia. – PP. 625–630.

9. Kiselychuk O., Bodson M., Wang J. Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators // *Proc. of 21-st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation.* – Greece: Crete, 2013. – PP. 149–154.

10. Kiselychuk O., Wang J., Bodson M., Pushkar M. Maximum power extraction from self-excited induction generators // *Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal.* – Kremenchuk: KrNU, 2014. – Iss. 2/2014 (26). – PP. 70–78.

VOLTAGE CONTROL OF SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR WITH ELECTRONIC LOAD CONTROLLER

M. Pechenyk, V. Bovkunovich, M. Pushkar

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

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

Self-excited induction generators are becoming more prevalent in autonomous power systems. But the control of the generated voltage and defining its static characteristics are the tasks that until now were based only on the iterative approaches. Previously the approaches have been proposed for the development of the control systems of the induction generators based on the analytic dependences. This article discusses the implementation of analytical dependences for self-excitation boundaries and static characteristics of three-phase induction generator for the design of the 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. Youssef, K.H., Wahba, M.A., Yousef, Hasan A. and Sebakhy, O.A. (2008), "A new method for voltage and frequency control of stand-alone self-excited induction generator using PWM converter with variable DC link voltage", *Proc. of American Control Conference*, 11–13 June 2008, pp. 2486–2491.
3. Chen, W.-L., Lin, Y.-Hs., Gau, H.-S. and Yu C.-H. (2008), "STATCOM controls for a self-excited induction generator feeding random loads," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, no. 4, pp. 2207–2215.
4. 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.
5. Ramirez, J.M. and Torres, E. (2007), "An electronic load controller for the self-excited induction generator," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, no. 2, pp. 546–548.
6. 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.
7. 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.
8. 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)*, Ischia, Italy, pp. 625–630.
9. Kiselychnyk, O., Bodson, M. and Wang, J. (2013), "Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators," *Proc. of 21-st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, Crete, Greece, pp. 149–154.
10. Kiselychnyk, O., Wang, J., Bodson, M. and Pushkar, M. (2014), "Maximum power extraction from self-excited induction generators", *Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal*, Vol. 2, no. 26, pp. 70–78.

Стаття надійшла 29.05.2015.