

А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, А. А. Євченко, Т. Я. Дзьоба
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроприводу та комп’ютеризованих електромеханічних систем
НДЛ-4

АНАЛІЗ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ ІЗ БЕЗЩІТКОВОЮ СИСТЕМОЮ ЗБУДЖЕННЯ

© Куцик А. С., Семенюк М. Б., Євченко А. А., Дзьоба Т. Я., 2017

Проаналізовано перехідні електромеханічні та електромагнітні процеси в системі генерування електроенергії турбогенератором з безщітковою системою збудження для основних режимів роботи турбогенератора. Аналіз виконано за допомогою розроблених з використанням об’єктно-орієнтованого методу математичної та комп’ютерної моделей, які враховують нелінійність синхронних машин та дискретність роботи вентильних перетворювачів.

Ключові слова: системи генерування електроенергії, турбогенератор, безщіткова система збудження, математичне моделювання.

The electromechanical and electromagnetic transient processes in a power generation system with turbo-generator and brushless excitation for main working regimes are analyzed in the article. An analysis has been carried out by means of developed with the use of the object-oriented method the mathematical and computer models that take into account non-linearity of synchronous machines and discreteness of semiconductor converters.

Keywords: power generation system, turbo-generator, brushless excitation system, mathematical modeling.

Постановка проблеми

На теплових та атомних електростанціях для вироблення електроенергії використовують здебільшого турбогенератори потужністю від 200 до 1000 МВт. Такі турбогенератори, поєднані з системою збудження, турбіною та блоковими трансформаторами, формують систему перетворення механічної енергії на електричну.

Головним засобом керування процесом перетворення енергії турбогенератором є система збудження, яка забезпечує регулювання напруги та реактивної потужності на його виході, стійкість роботи генератора в електромережі, визначає якісні показники перехідних процесів, пов’язаних зі зміною завантаження генератора активною та реактивною потужністю. Враховуючи складність та важливість завдань, покладених на систему збудження, аналіз основних режимів її роботи є важливим для модернізації існуючих енергоблоків та проектування нових систем електромеханічного перетворення енергії. Такий аналіз необхідно проводити, враховуючи такі основні фактори: нелінійність синхронної машини, реальний характер навантаження генератора та наявність паралельно працюючих генераторів на електростанції, дискретність роботи вентилів системи збудження. Врахування цих факторів ускладнює задачу аналізу, а розширення цілей аналізу, синтезу та діагностування потребує вдосконалення існуючих методів математичного моделювання складних нелінійних електротехнічних систем.

Аналіз останніх досліджень

Турбогенератори потужністю від 500 до 1000 МВт обладнують безщітковими системами збудження, в яких збудження турбогенератора здійснюється від допоміжної безщіткової синхронної машини, струм збудження якої регулюється, своєю чергою, тиристорним перетворювачем. Значні величини струму збудження потужних турбогенераторів не дають змоги використати в цьому випадку статичні системи збудження з прямим регулюванням струму збудження тиристорним перетворювачем, які використовують для регулювання збудження синхронних генераторів менших потужностей [1–2]. Такі безщіткові (електромашинні), а також статичні системи – це два основні різновиди побудови силової частини сучасних систем збудження генераторів. Водночас сьогодні пропонується багато підходів до синтезу систем автоматичного регулювання збудження (автоматичних регуляторів збудження АРЗ). Крім класичних регуляторів, синтезованих за допомогою лінеаризованих моделей, пропонується використання методів нелінійної теорії керування, зокрема *feedback linearization*, а також інтелектуальних регуляторів, побудованих за принципами теорії штучних нейронних мереж та теорії нечітких множин [3–5]. Питанню синтезу систем автоматичного регулювання збудження приділяють підвищену увагу з огляду на те, що їх робота є визначальною для забезпечення стійкості роботи генератора в енергосистемі та якості регулювання напруги.

Для синтезу систем керування електромеханічними та електроенергетичними системами необхідною є інформація про поведінку системи в різних режимах роботи. Отримання такої інформації можливе у разі застосування адекватних математичних та комп'ютерних моделей. Використання спрощених лінеаризованих моделей електричних машин та напівпровідникових перетворювачів вносить значні похибки в одержані результати і не дає змоги відобразити адекватно процеси в усіх режимах роботи електротехнічного об'єкта, що істотно знижує якість роботи синтезованих регуляторів. У зв'язку з цим доцільним є застосування уточнених моделей, в яких враховано нелінійність електричних машин та напівпровідникових перетворювачів.

Формування цілей статті

Метою статті є аналіз основних перехідних режимів роботи системи генерування електроенергії турбогенератором з безщітковою системою збудження, а саме: режимів початкового збудження генератора, регулювання напруги на неробочому ході, вмикання генератора в лінію, завантаження генератора активною та реактивною потужністю. Такий аналіз проводився на прикладі реальної системи генерування електроенергії енергоблоку Південноукраїнської АЕС.

Виклад основного матеріалу

Для розв'язання задач аналізу режимів роботи системи генерування електроенергії, налаштування АРЗ, діагностування системи збудження турбогенератора та навчання оперативного персоналу в Національному університеті «Львівська політехніка» у співпраці з підприємством «Вестрон» (м. Харків) та із залученням спеціалістів Південноукраїнської АЕС розроблено цифровий діагностичний комплекс (ЦДК) «МЕТР» [6, 7]. Він являє собою функціонуючу в реальному масштабі часу комп'ютерну модель системи генерування електроенергії, яка охоплює турбіну, генератор з безщітковою системою збудження, паралельно працюючі генератори сусідніх енергоблоків та лінію електропередавання. Ця комп'ютерна модель містить і модель АРЗ, однак особливістю ЦДК є можливість під'єднання до функціонуючої в реальному масштабі часу комп'ютерної моделі силової частини системи генерування електроенергії реального АРЗ з метою його діагностування, налаштування параметрів регуляторів, а також навчання оперативного персоналу. Для цього ЦДК містить комплекс технічних засобів (плати ЦАП/АЦП, підсилювачі, давачі) для під'єднання фізичних пристроїв керування.

Взаємодія оператора з ЦДК здійснюється за допомогою графічного інтерфейсу (рис. 1), реалізованого на ПК, який дає змогу задавати основні параметри та керувати режимами роботи.

Система генерування електроенергії (функціональну схему показано у вікні інтерфейсу на рис. 1) містить 3 паралельно працюючі турбогенератори ТГ1, ТГ2, ТГ3 потужністю 1000 МВт.

Номинальні дані турбогенераторів: $I_n = 26,7 \text{ кА}$, $U_n = 24 \text{ кВ}$, $\cos\phi_n = 0.9$. Система збудження турбогенераторів містить безщітковий збудник (системи збудження турбогенераторів ТГ2 і ТГ3 на рис. 1 не показані).

Особливістю реалізованої в ЦДК цифрової моделі системи генерування електроенергії є: врахування нелінійностей електричних машин (моделюються у фазних координатах) та напівпровідникових перетворювачів (кожен вентиль перетворювача моделюється RL-ланкою), врахування несиметрії та взаємних впливів між всіма складовими; можливість взаємодії моделі з реальним фізичним обладнанням через аналогові та дискретні сигнали.

Для створення такої моделі використано числовий однокроковий метод середніх напруг на кроці чисельного інтегрування [8]. До складу комп'ютерної моделі входить також автоматичний регулятор збудження сильної дії, описаний в [9].

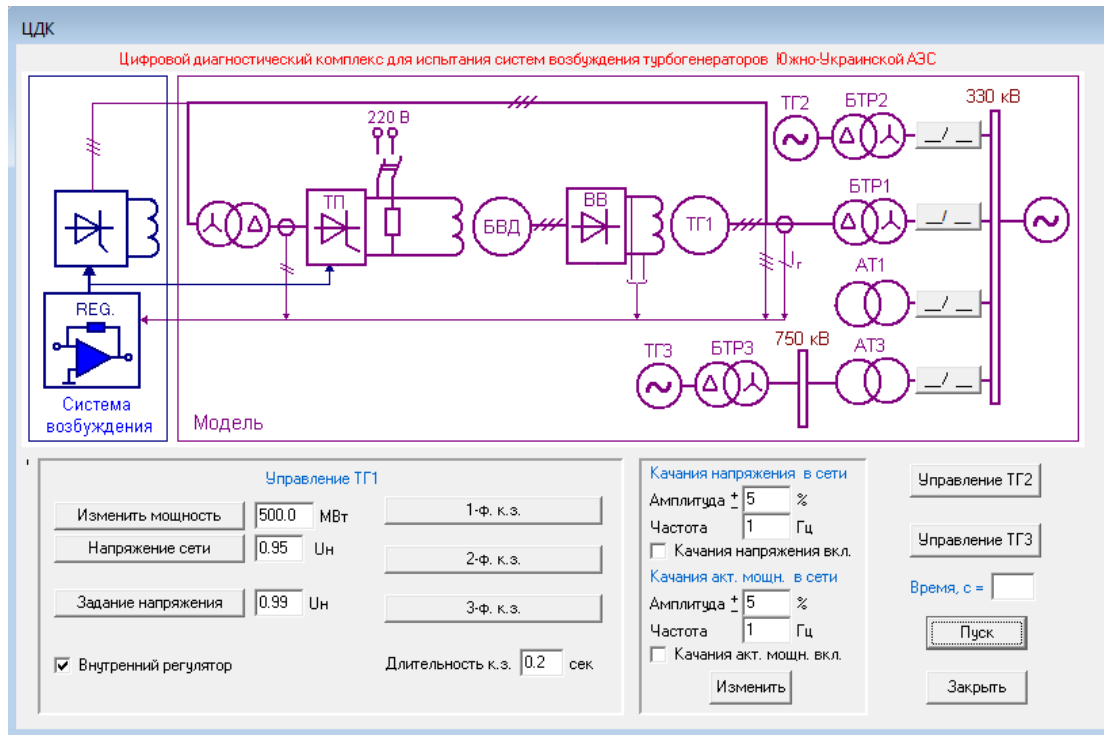


Рис. 1. Головне вікно інтерфейсу програмного забезпечення цифрового діагностичного комплексу для безщіткової системи збудження

Нижче наведено результати аналізу основних перехідних режимів роботи системи генерування електроенергії.

Режим початкового збудження

У режимі початкового збудження напруга статора генератора зростає від 0 до 13,7 кВ (рис. 2, а). Статична похибка регулювання напруги складає 1%. Тривалість зростання напруги генератора 13,5 с і відповідає закладеному в регулятор алгоритму програмного збудження. Перерегулювання практично відсутнє (менше за 1 %).

Струм збудження (рис. 2, б) зростає до значення 2300 А, що відповідає струму неробочого ходу. Величина перерегулювання за струмом збудження – 7,5 %. Відсутність перерегулювання за напругою (рис. 2, а) у цьому випадку пояснюється впливом демпферних контурів ротора генератора.

Амплітуда розрахункових струмів на вході тиристорного перетворювача в усталеному режимі складає 96 А (рис. 3, а), що відповідає усталеному значенню струму збудження збудника (рис. 3, б).

Величина струму статора генератора в усталеному режимі складає 230 А (діюче значення), що становить 0,9 % від номінального значення.

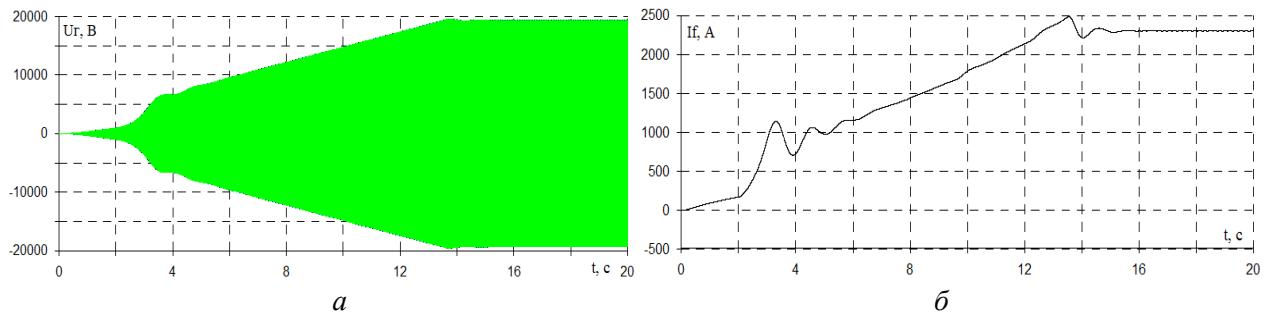


Рис. 2. Розрахункове миттєве значення фазної напруги статора генератора (а), розрахункове значення струму збудження генератора (б)

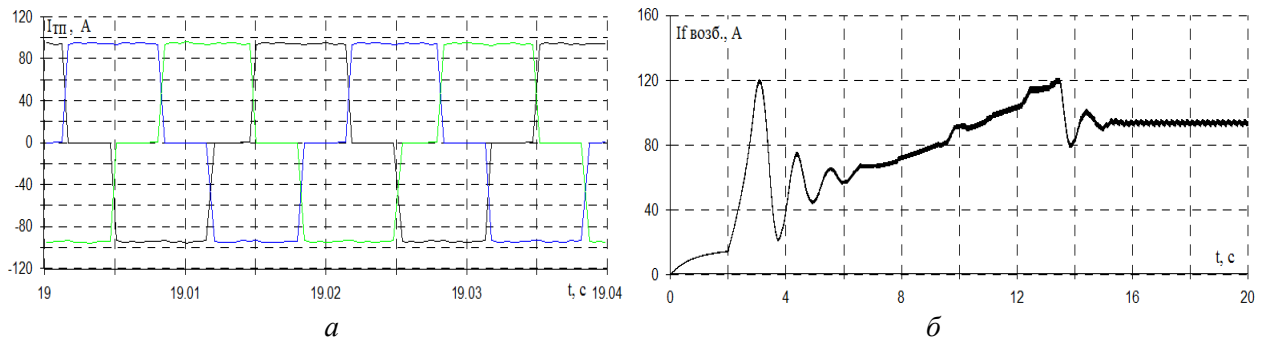


Рис. 3. Розрахункові значення струмів на вході тиристорного перетворювача в усталеному режимі (а), розрахункове значення струму збудження збудника в перехідному режимі (б)

На рис. 4 показано розрахункові значення напруги збудження збудника та напруги збудження генератора. Форма напруги збудження генератора (рис. 4, б) відповідає частоті 150 Гц напруги збудника.

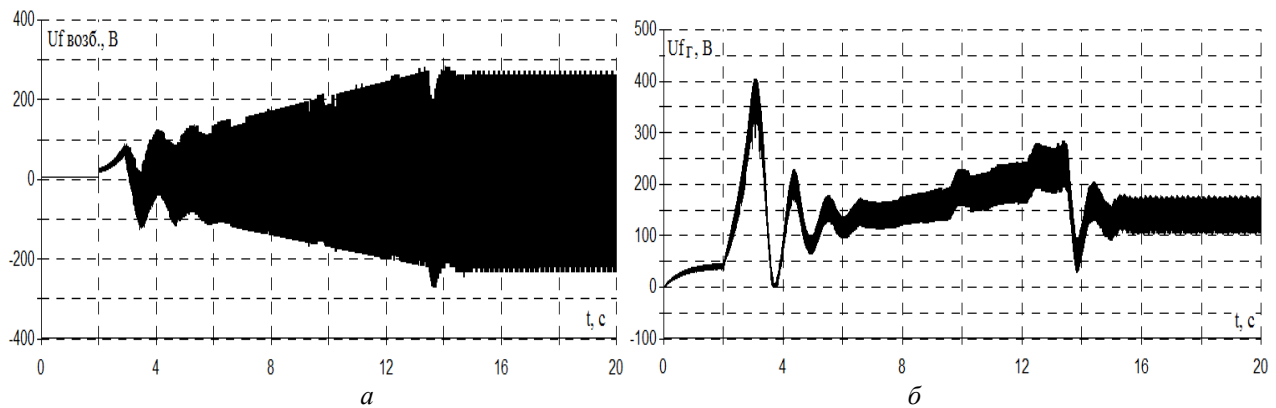


Рис. 4. Розрахункові значення напруги збудження збудника (а) і генератора (б) в перехідному режимі

Режим регулювання напруги генератора на неробочому ході

У режимі регулювання напруги генератора на неробочому ході програмно задаємо значення завдання напруги генератора $0,95U_n$ на 21 с та $1,0U_n$ на 29 с розрахунку. Осцилограми перехідних процесів для напруги генератора та струму збудження генератора показано на рис. 5.

Величина напруги генератора змінюється відповідно до зміни завдання (рис. 5, а). Перехідний процес збільшення напруги супроводжується кидками струму збудження величиною 800 А (рис. 5, б). Тривалість перехідного процесу складає 2,2 с.

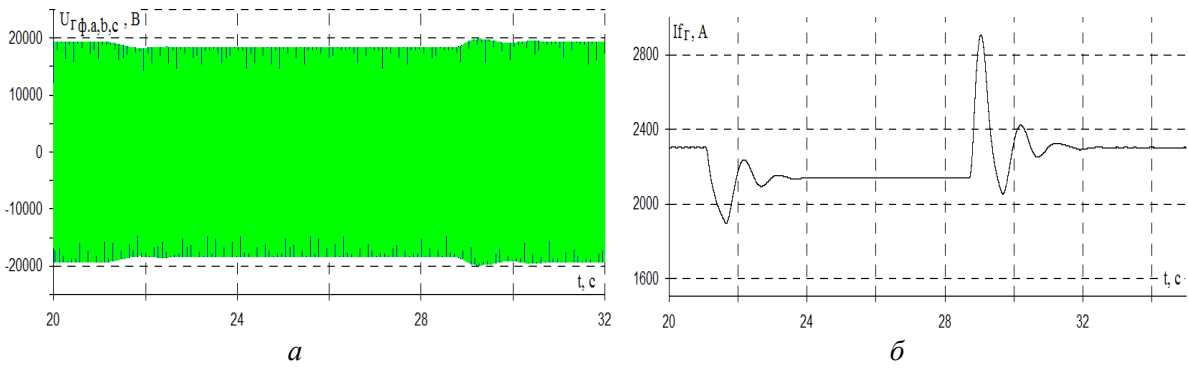


Рис. 5. Розрахункове миттєве значення фазної напруги статора генератора (а), розрахункове значення струму збудження генератора (б)

Режим ввімкнення генератора в мережу

У режимі ввімкнення генератора в мережу напруга статора генератора практично не змінюється (рис. 6, б). Активна потужність дорівнює нулю (рис.7, б). Генератор генерує реактивну потужність в мережу, величина якої 155 МВА (рис. 7, б), з одночасним збільшенням струму збудження до 3070 А (43 % від номінального значення), що проілюстровано на рис.7, а. Діюче значення струму статора (реактивна складова) в усталеному режимі 3780 А, що становить 14 % від номінального значення (рис. 6, а). Величина струму збудження, струму статора і реактивної потужності залежить від співвідношення напруги генератора та напруги мережі.

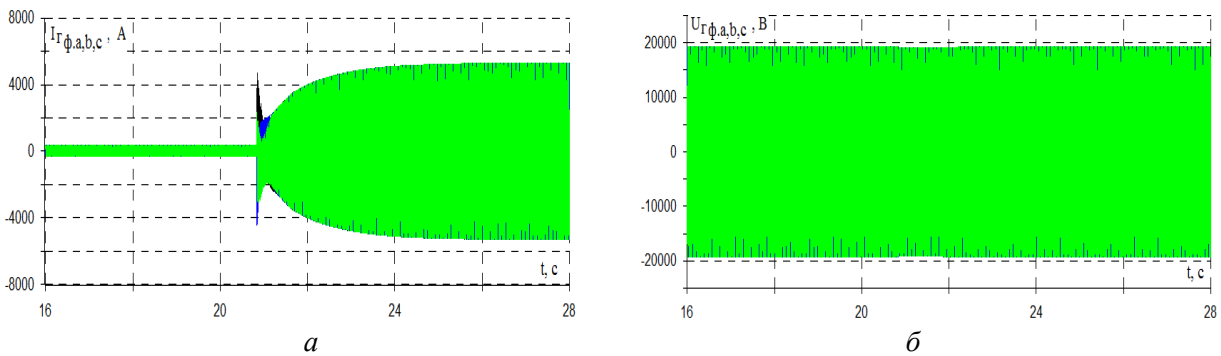


Рис. 6. Розрахункове миттєве значення струму статора генератора (а), розрахункове миттєве значення фазної напруга статора генератора (б)

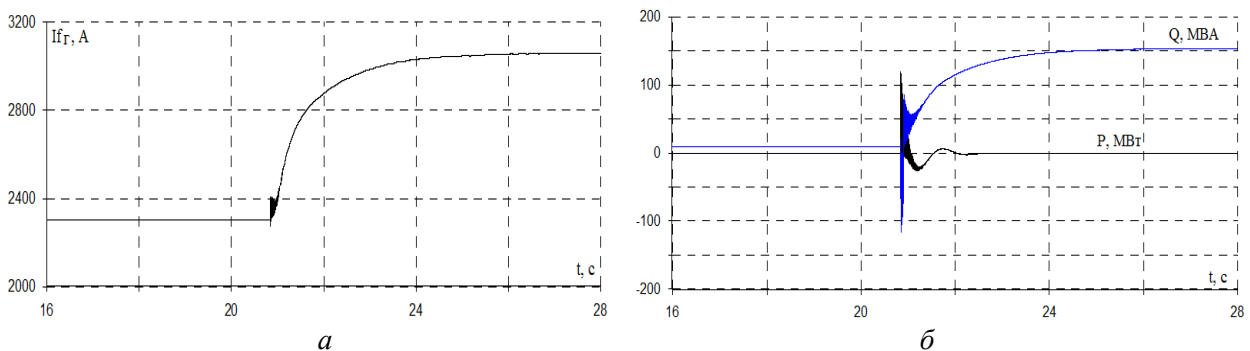


Рис. 7. Розрахункове миттєве значення струму збудження генератора (а), активна та реактивна потужність на виході генератора (б)

Режим завантаження генератора реактивною потужністю

Режим завантаження генератора реактивною потужністю здійснюється шляхом зменшення напруги мережі до значення $0,95U_n$. Розрахункові значення напруги статора, струму збудження струму статора генератора, активної та реактивної потужності наведено на рис. 8–9.

Статична похибка регулювання напруги генератора в усталеному режимі становить 0,7 %, динамічна похибка регулювання – 3,9 %. Активна потужність генератора в цьому режимі дорівнює нулеві. Реактивна потужність на виході генератора збільшується до величини 590 МВА (рис. 9, б), струм статора (реактивна складова) збільшується до величини діючого значення 14,4 кА (рис. 9, а). Струм збудження збільшується до величини 5300 А.

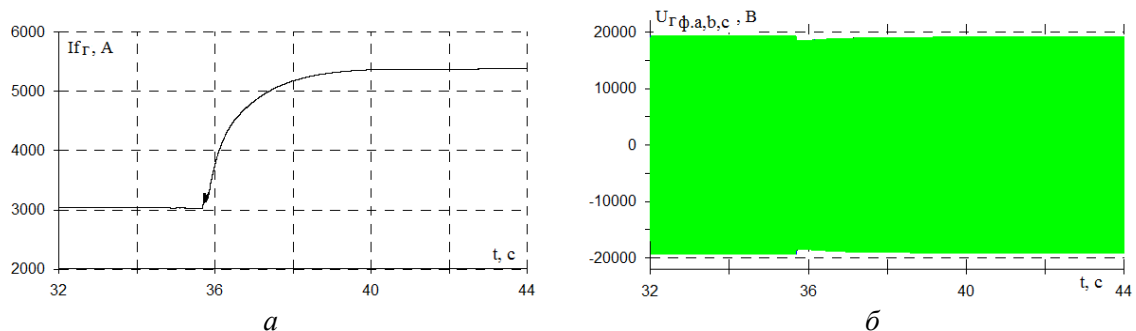


Рис. 8. Розрахункові значення струму збудження генератора (а), розрахункові значення фазної напруги статора генератора (б)

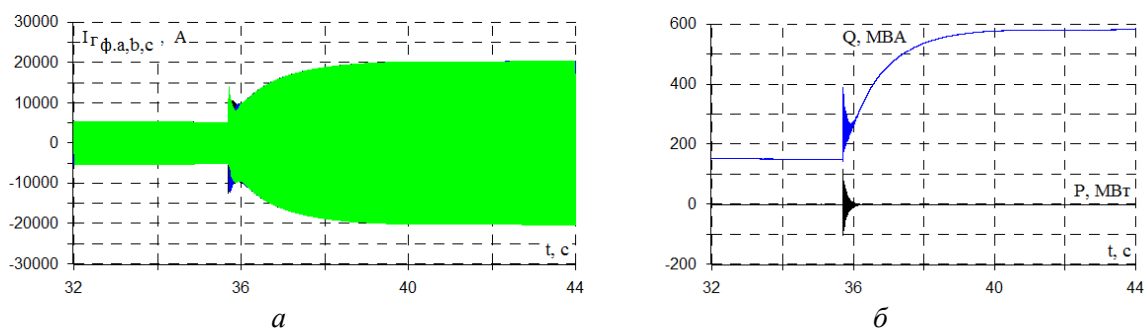


Рис. 9. Розрахункові миттєві значення струму статора генератора (а), активна і реактивна потужність на виході генератора (б)

Режим завантаження генератора активною потужністю

У режимі завантаження генератора активною потужністю (995 МВт) струм статора зростає до величини 24,5 кА (рис. 11, а). Напруга генератора при цьому суттєво не змінюється, зокрема статична похибка регулювання напруги становить 0,7 % (рис. 10, б). Це пояснюється збільшенням струму збудження генератора до значення 5450 А (рис. 10, а). Реактивна потужність на виході генератора при цьому є незначною і становить 30 МВА (рис. 11, б). Перехідний процес, який не супроводжується суттєвими коливаннями, триває близько 6 с.

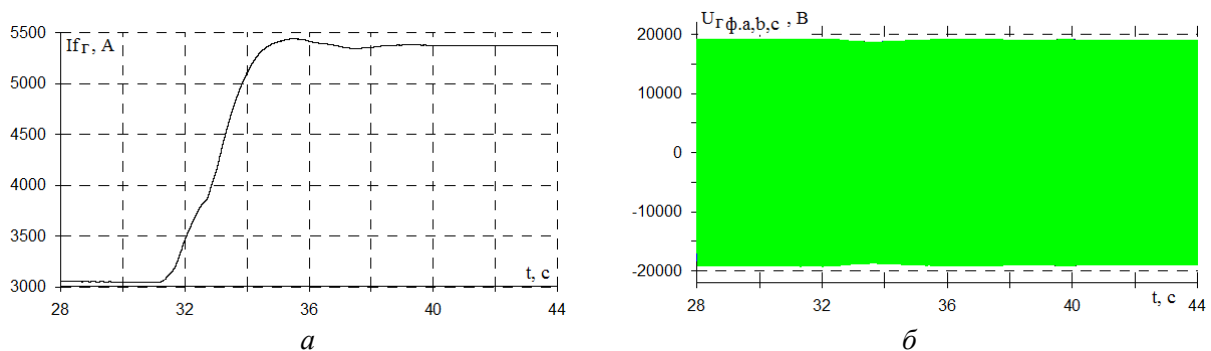


Рис. 10. Розрахункові значення струму збудження генератора (а), розрахункові миттєві значення фазної напруги статора генератора (б)

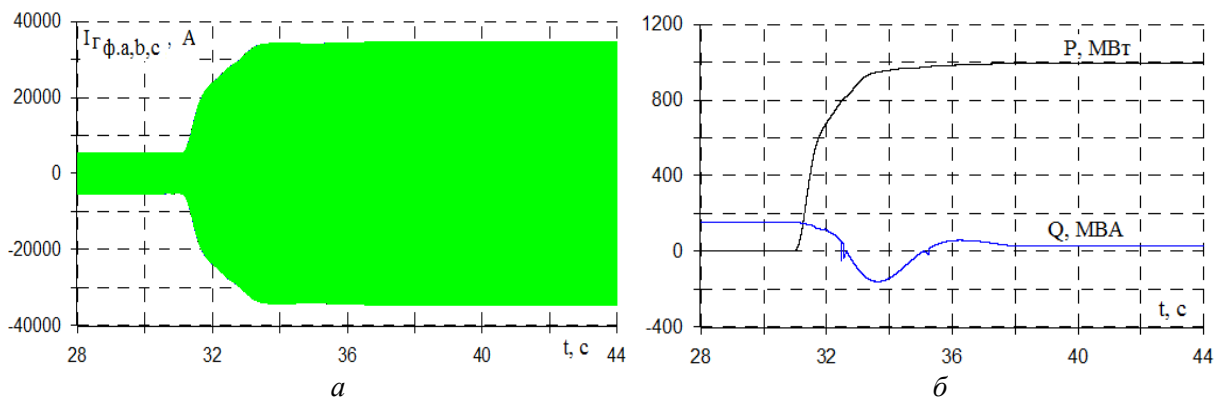


Рис. 11. Розрахункове миттєве значення струму статора генератора (а), активна та реактивна потужність на виході генератора (б)

Висновки

Безщиткова система збудження турбогенератора із системою автоматичного регулювання збудження сильної дії забезпечує високу якість перехідних процесів в основних режимах роботи турбогенератора. Зокрема максимальна динамічна похибка регулювання напруги, яка виникає у разі п'ятипроцентного просідання напруги в мережі, за результатами досліджень становила 3.9 %, а статична похибка – до 0.7 %.

Наявність допоміжної електричної машини – безщиткового збудника в каналі регулювання струму збудження головного турбогенератора дещо сповільнює швидкість регулювання струму збудження порівняно зі статичними системами збудження. Так, час перехідного процесу під час регулювання напруги турбогенератора на неробочому ході становить близько 2 с.

1. Likaa Fahmi Ahmed Izzat *Development in Design of Brushless Self-Excited and Self-Regulated Synchronous Generator* / Likaa Fahmi Ahmed Izzat, Siegfried Heier // *International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Madrid, Spain, 20–23 October 2013.* – PP. 1024–1029.
2. Jerkovic V. *Excitation System Models of Synchronous Generator* / V. Jerkovic, K. Miklosevic, Z. Spoljaric // *SIP 2010 28th International Conference Science in Practice, Subotica Tech – College of Applied Sciences, Subotica, Serbia, June 3–4, 2010.* – P. 77–82.
3. Yan R. *Power system transient stability enhancement with an adaptive control scheme using backstepping design* / R. Yan, Z. Y. Dong, T. K. Saha, and R. Majumder, // *Proc. of IEEE PES General Meeting, 24–28 June 2007.* – P. 1–8.
4. Mahmud M. A. *An alternative LQR based excitation controller design for power system to enhance small-signal stability* / M. A. Mahmud // *Int. Journal Elect. Power Eng. Syst., vol. 63, December 2014.* PP. 1–7.
5. Yuan CAO *Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System* / CAO Yuan, MA Jin // *5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), IEEE Publisher, 2010.* – P. 1–5.
6. Plachtyna O. *A hybrid model of the electrical power generation system* / O. Plachtyna, A. Kutsyk // *Proceeding of 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), IEEE Conference Publications, Wydgoszcz – 2016.* – P. 16–20.
7. Плахтина О. Г. *Аналіз методом математичного моделювання динаміки паралельної роботи турбогенераторів Південно-Української АЕС* / О. Г. Плахтина, А. С. Куцик, В. П. Чумак., М. О. Мальцев // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. випуск «Проблеми автоматизованого ЕП. Теорія і практика».* – Кременчук, 2012. – С. 342–343.
8. Плахтина О.Г. *Числовий однокроковий метод аналізу електричних кіл і його застосування в задачах електромеханіки* / О. Г. Плахтина // *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут».* – 2008. – № 30. – С. 223–225.
9. Юрганов А. А. *Регулирование возбуждения синхронных генераторов [Текст]* / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.