

А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, В. О. Місюренко  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ЗБУДЖЕННЯ

© Куцик А. С., Семенюк М. Б., Місюренко В. О., 2016

Наведено результати аналізу режимів роботи синхронного генератора в електротехнічній системі з широтно-імпульсним регулюванням струму збудження. Дослідження виконані за допомогою методу математичного моделювання.

*Ключові слова: електротехнічна система, статична система збудження, синхронний генератор, широтно-імпульсний перетворювач, автоматичний регулятор збудження, широтно-імпульсна модуляція, тиристорний перетворювач, частота модуляції.*

The article presents an analysis of modes of synchronous generator in the electrical system of the pulse-width control excitation current of synchronous generator. Researches are performed by the method of mathematical modelling.

*Key words: electrotechnical system, static excitation system, synchronous generator, full bridge DC/DC converter, automatic voltage regulator, pulse width modulation, semiconductor controlled rectifier, frequency modulation.*

### Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень

Для регулювання струму збудження синхронних генераторів (СГ) потужністю до 300 МВт на електростанціях України широко використовують статичні системи збудження, в яких струм збудження СГ регулюється тиристорним перетворювачем, зібраним за трифазною мостовою схемою [4, 5]. Такі системи збудження забезпечують високу швидкодію регулювання напруги збудження СГ. У статичних системах збудження СГ (потужністю до 7,2 МВА) фірми Siemens, що використовуються за кордоном, для живлення обмотки збудження СГ застосовують широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП), на базі транзисторів Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), які працюють з частотою комутації 1–10 кГц [6, 8]. Такі системи є простішими у виконанні і забезпечують кращу якість регулювання збудження.

Завдання розроблення нових систем збудження з використанням ШІП та модернізації наявних систем збудження СГ із самозбудженням, які експлуатуються на теренах України, вимагає аналізу режимів роботи систем генерування електроенергії у всіх режимах роботи, який доцільно проводити методом математичного моделювання. Застосування в цьому випадку спрощених лінеаризованих математичних моделей СГ із системою збудження, зокрема описаних в [5], не забезпечує отримання адекватного результату для режимів, що характеризуються значним діапазоном зміни координат. Натомість такі дослідження доцільно виконувати за допомогою математичних моделей, що враховують нелінійність синхронної машини, вплив демпферних контурів, а також несиметричні стани.

### Завдання дослідження

Завданням дослідження є аналіз режимів роботи системи генерування електроенергії синхронним генератором з самозбудженням з використанням широтно-імпульсного регулювання струму збудження та обґрунтування доцільності використання такої системи регулювання збудження.

### Статичні системи збудження СГ з широтно-імпульсним регулюванням

У системі генерування електроенергії з СГ (рис. 1, а) та статичною системою із самозбудженням струм збудження СГ формується широтно-імпульсним перетворювачем (ШПП), який отримує живлення від некерованого випрямляча (НВ) та вхідного трансформатора напруги (ТН), первинна обмотка якого під'єднана до статора СГ. НВ зібраний за трифазною мостовою схемою (рис.1, б). ШПП виконаний за мостовою схемою з симетричним керуванням на базі чотирьох IGBT (рис. 1, б), частота комутації яких становить 1 кГц. Робота IGBT здійснюється у функції коефіцієнта заповнення імпульсу  $\gamma$ , який є пропорційний до напруги на виході АРЗ. За такого керування напруга на виході ШППа, тобто напруга збудження СГ, є двополярною.

Для забезпечення потрібної якості регулювання напруги на виході генератора в цій системі пропонується використати автоматичний регулятор збудження (АРЗ), який реалізує пропорційно-інтегральний або пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання напруги генератора з зовнішнім контуром регулювання напруги статора СГ та внутрішнім – регулювання струму збудження СГ [7].

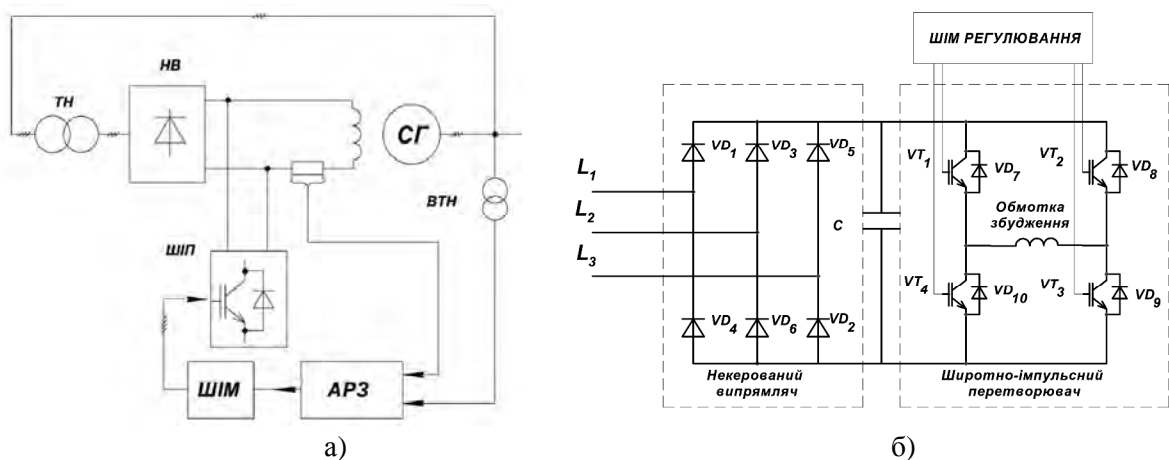


Рис. 1. Система генерування електроенергії синхронним генератором з ШІМ регулюванням струму збудження: функціональна схема (а), електрична схема силової частини статичної системи збудження з ШІП (б)

### Математична модель

Для аналізу нормальних режимів в описаній системі розроблено математичну модель на основі теорії математичного моделювання електромашинувентильних систем [3] з застосуванням об'єктно-орієнтованого методу [1]. Математична модель враховує нелінійність синхронної машини, взаємні впливи між генератором, його системою збудження та електромережею. До складу моделі згідно з розрахунковою схемою (рис. 2) входять об'єктно-орієнтовані моделі окремих елементів: синхронної машини СМ, мережі МЕР, RL-ланок з ЕРС, системи керування. На розрахунковій схемі (рис. 2) позначено:  $i_0 \dots i_{11}$  – струми електричних віток структурних елементів,  $\varphi_1 \dots \varphi_5$  – потенціали незалежних вузлів системи.

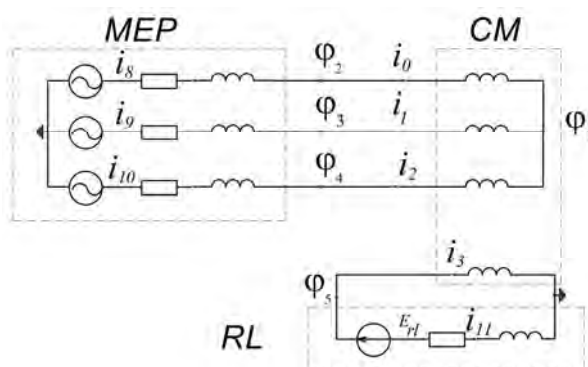


Рис. 2. Розрахункова схема системи генерування електроенергії синхронним генератором з ШІМ регулюванням струму збудження

Відзначимо, що у використаній математичній моделі СГ обмотка статора описана у фазних координатах, а вплив демпферної системи ротора враховано двома короткозамкненими RL-ланками, зорієнтованими по осях  $d$  і  $q$  [2].

Структурна схема системи автоматичного регулювання вихідної напруги генератора, в якій внутрішній контур регулювання струму збудження генератора підпорядкований контуру регулювання напруги, показана на рис. 3. Система регулювання, також, забезпечує обмеження струму збудження СГ в перехідних режимах.

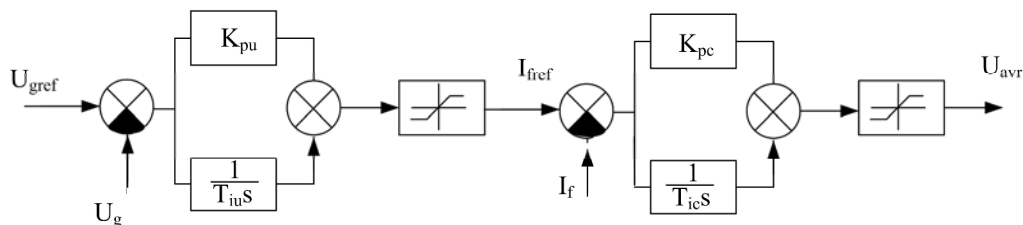


Рис.3. Структурна схема системи автоматичного регулювання збудження:  $U_{gref}$ ,  $U_g$  – задане і поточне значення напруги статора синхронного генератора,  $I_{fref}$ ,  $I_f$  – задане і поточне значення струму збудження синхронного генератора,  $K_{pu}$ ,  $T_{iu}$  – коефіцієнт підсилення та стала часу ПІ-регулятора напруги,  $K_{pc}$ ,  $T_{ic}$  – коефіцієнт підсилення та стала часу ПІ-регулятора струму збудження,  $U_{avr}$  – напруга на виході автоматичного регулятора збудження

У математичній моделі ШПП представлений RL-ланкою з ЕРС, миттєве значення якої на періоді роботи ключів ШППа  $T$  визначається згідно з виразом (1) та наведеним на рис. 4.

$$\begin{aligned} E_{rl} &= U_{HB}, \text{ якщо } 0 \leq t < \gamma T, \\ E_{rl} &= -U_{HB}, \text{ якщо } \gamma T \leq t < T, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $E_{rl}$  – ЕРС RL-ланки;  $\gamma$  – коефіцієнт заповнення імпульсу ШПП;  $T = \frac{1}{f_K}$  – період роботи транзисторів IGBT ШПП;  $t$  – час;  $f_K$  – частота комутації транзисторів IGBT ШППа;  $U_{HB}$  – максимальна напруга на виході некерованого випрямляча, виконаного за трифазною мостовою схемою випрямлення.

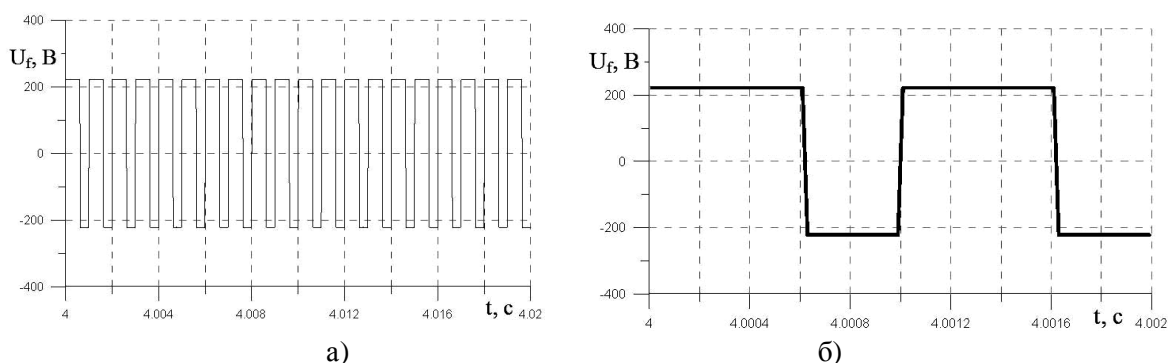


Рис. 4. Напруга збудження СГ за період, що відповідає частоті змінної напруги 50 Гц (а), і за два періоди роботи транзисторів ШППа (б)

Коефіцієнт заповнення імпульсу ШППа визначається згідно з формулою (2).

$$\gamma = \frac{U_{avr}}{U_{avrmax}}, \quad (2)$$

де  $U_{avrmax}$  – максимальне значення напруги на виході автоматичного регулятора збудження.

Максимальна напруга на виході некерованого випрямляча, виконаного за трифазною мостовою схемою випрямлення, визначається згідно з виразом (3).

$$U_{\text{НВ}} = \frac{\sqrt{\frac{2(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2)}{3}}}{k_c}, \quad (3)$$

де  $U_a, U_b, U_c$  – фазні напруги статора СГ,  $k_c$  – коефіцієнт, що враховує коефіцієнт трансформації трансформатора напруги ТН та коефіцієнт схеми випрямлення НВ (рис.1, а).

### Результати досліджень

Параметри системи генерування електроенергії, використані для математичного моделювання, є такими. Для синхронного генератора (типу СГД-16-69-6УХЛ4):  $P_{\text{ном}} = 3500$  кВт; номінальні напруга та струм  $U_{\text{ном}} = 6300$  В,  $I_{\text{ном}} = 400$  А; струм збудження неробочого ходу  $i_{\text{фн.х.}} = 180$  А; номінальний струм збудження  $i_{\text{фн}} = 300$  А; активні опори обмоток статора та збудження  $r_{\text{ст}} = 0.47$  Ом,  $r_f = 0.3$  Ом; індуктивні опори  $X_d = 1.23$  в.о.,  $X_q = 0.709$  в.о. Кількість пар полюсів  $p_0 = 3$ . Момент інерції агрегату  $8500$  кг·м<sup>2</sup>. Налаштування системи автоматичного регулювання збудження виконано експериментально з умови забезпечення належних якісних показників регулювання напруги СГ.

На рис. 5–8 наведені результати дослідження режимів початкового збудження СГ та завантаження активною потужністю.

У режимі початкового збудження СГ система регулювання збудження забезпечує швидке (при максимальному форсуванні за напругою збудження) наростання вихідної напруги СГ до заданого номінального значення без перерегулювання (рис. 5, б). Зауважимо, що перерегулювання струму збудження, в цьому випадку, становить близько 17% (рис. 5, а). Відсутність перерегулювання за напругою пояснюється впливом демпферної системи генератора (рис.6, а).

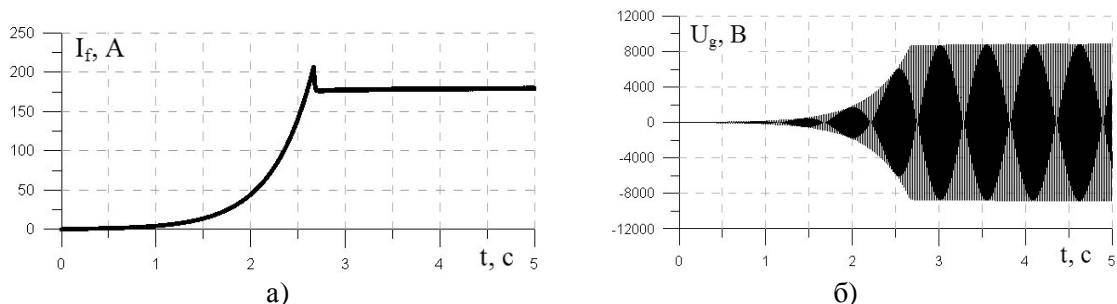


Рис. 5. Струм збудження (а) та напруга статора (б) СГ у режимі початкового збудження СГ

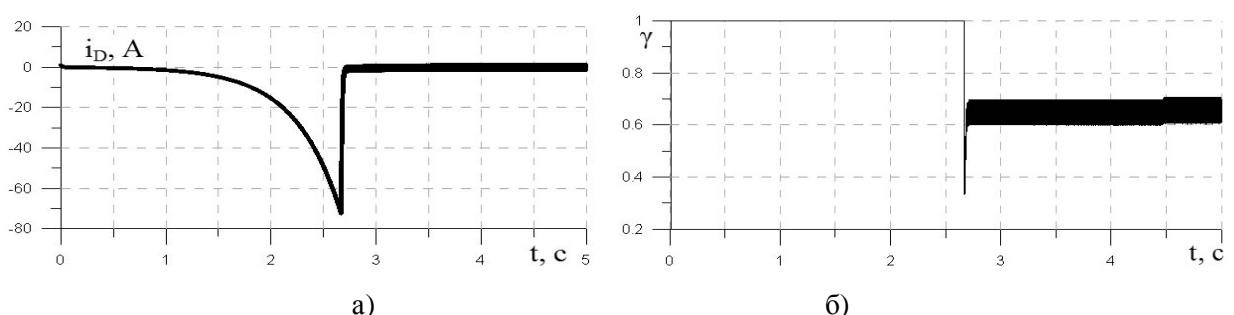


Рис. 6. Струм по осі d демпферної системи СГ (а) та коефіцієнт заповнення імпульсу ШПв (б) у режимі початкового збудження СГ

У режимі вмикання генератора в мережу з його 100 % плавним завантаженням активною потужністю відбувається зростання струму статора генератора з кількома пульсаціями (рис. 7, б). Динамічна похибка регулювання напруги на виході СГ становить близько 1,5 %, а статична похибка регулювання дорівнює нулю (рис. 7, а).

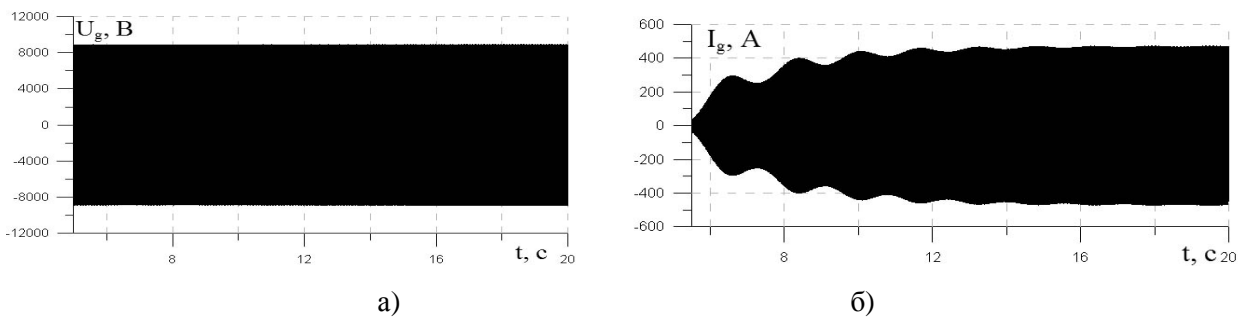


Рис. 7. Напряга статора (а) та струм статора (б) СГ у режимі завантаження активною потужністю СГ

Кут навантаження генератора в режимі завантаження активною потужністю зростає до  $52^{\circ}$  (рис. 8, б).

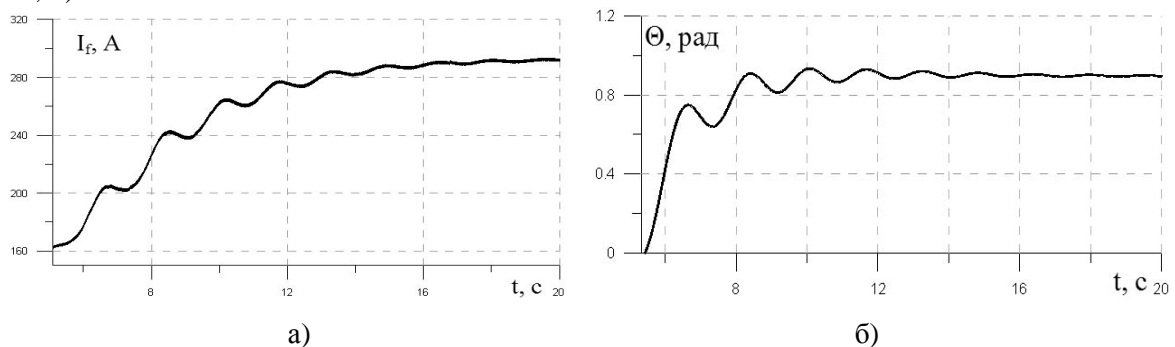


Рис. 8. Струм збудження (а) та кут навантаження (б) СГ у режимі завантаження активною потужністю СГ

У режимі завантаження СГ реактивною потужністю (рис. 10, а), який забезпечується збільшенням завдання напруги статора СГ (рис. 11, б) та відповідно збільшенням струму збудження (рис. 11, а) (з 20 с), відбувається зростання струму генератора (рис. 9, а), яке пов'язано з збільшення реактивної складової струму. Активна потужність в цьому випадку в усталеному режимі залишається незмінною (рис. 9, б).

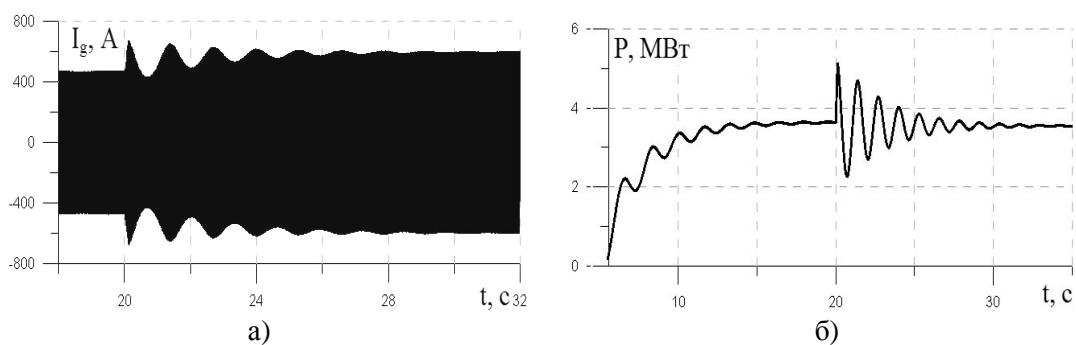


Рис. 9. Струм статора (а) та активна потужність (б) СГ у режимі завантаження реактивною потужністю

Враховуючи підвищені вимоги до якості вихідної напруги СГ, система збудження повинна мінімізувати пульсації струму збудження, обумовлені живленням обмотки збудження від напівпровідникових перетворювачів. Результати досліджень показали, що при використанні ШППа з частотою комутації транзисторів 1 кГц абсолютна пульсація струму збудження СГ становить 1,15 А, що відповідає 0,64 % (рис. 12, а), а в разі роботи ШППа з частотою комутації транзисторів 10 кГц амплітуда пульсацій струму збудження СГ становить 0,15 А, що відповідає 0,08 % (рис. 12, б).

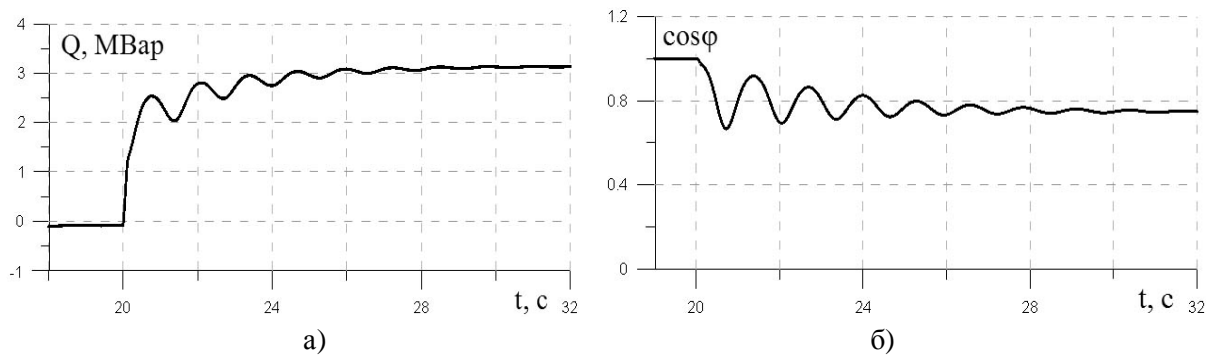


Рис. 10. Реактивна потужність (а) та  $\cos\varphi$  (б) СГ у режимі завантаження реактивною потужністю

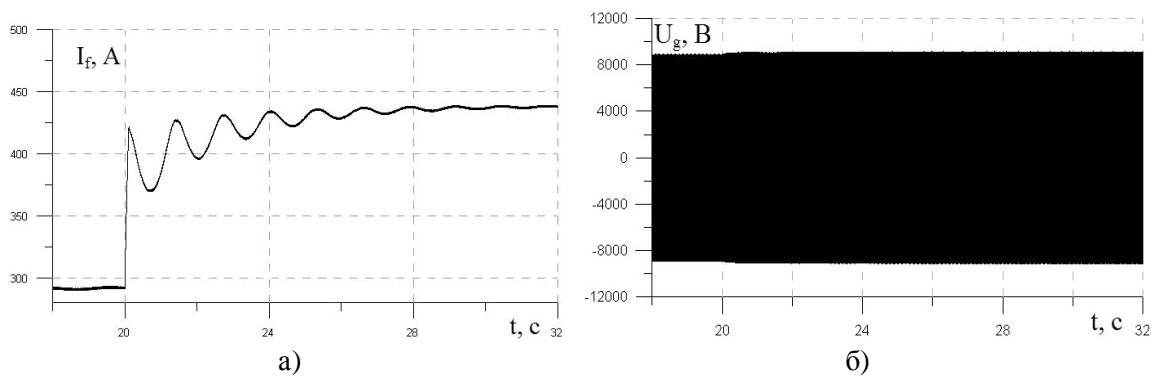


Рис. 11. Струм збудження (а) та напруга статора (б) СГ у режимі завантаження реактивною потужністю СГ

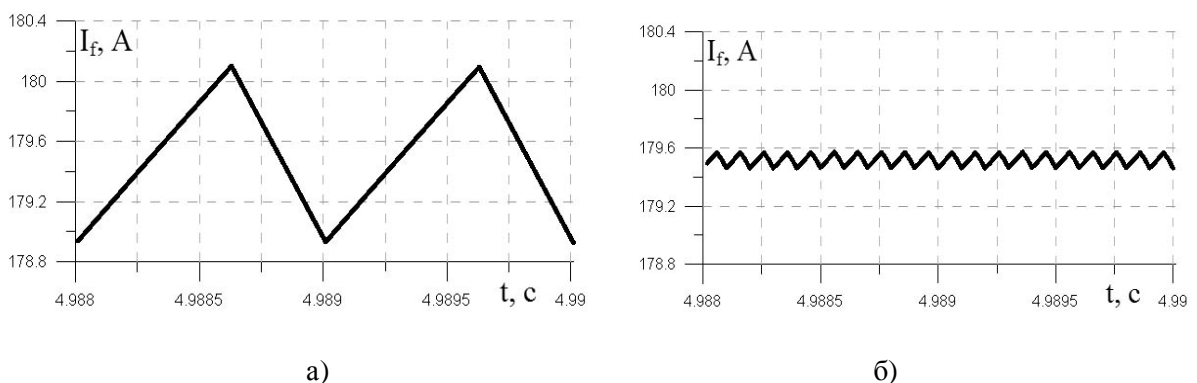


Рис. 12. Струм збудження СГ в усталеному режимі при частоті комутації транзисторів ШППа 1кГц (а) та 10 кГц (б)

### Висновки

Результати дослідження системи широтно-імпульсного регулювання струму збудження СГ з ПІ-регулятором напруги свідчать, що ця система забезпечує якісні показники регулювання напруги генератора, зокрема відсутність перерегулювання напруги в режимі початкового збудження, відсутність статичної похибки та незначну (до 1,5 %) динамічну похибку регулювання напруги в режимах завантаження генератора. Крім того, використання високої частоти модуляції (до 10 кГц) забезпечує мінімальні пульсації струму збудження (до 0,08 %). Такі пульсації струму збудження є меншими, ніж у разі використання для регулювання збудження шестипульсової схеми тиристорного перетворювача, який для забезпечення необхідних рівнів напруги збудження працює в усталеному номінальному режимі зі збільшеними кутами відкриття тиристорів. У зв'язку з цим, такі системи

регулювання збудження є перспективними для використання в системах генерування електроенергії синхронними генераторами порівняно невеликих потужностей (до 10 МВт).

1. Куцук А. С. *Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем* // *Технічна електродинаміка*. – 2006. – № 2. – С. 57–63. 2. Куцук А. С. *Математичне моделювання елементів електромеханічних систем згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу* / А. С. Куцук // *Електромашинобудування та електрообладнання: міжвідом. наук.-техн. зб. Одеський національний політехнічний інститут*. – 2005. – № 64, – С. 10–17. 3. Плахтына Е. Г. *Математическое моделирование электромашиноventильных систем* / Е.Г. Плахтына – Л.: Вища шк., 1986. – 161 с. 4. *Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: ГОСТ 21558-2000 – [Действующий от 2003-07-1]*. – Межгосударственный стандарт, 2003. – 24 с. 5. Юрганов А. А. *Регулирование синхронных генераторов* / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников – СПб.: Наука, 1996 – 138 с. 6. *Excitation systems solutions – Siemens AG Power Generation, 2003 15 p* [http://www.siemens.com.tr/i/content/3882\\_1\\_ExcitationSystemsPortfolio.pdf](http://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ExcitationSystemsPortfolio.pdf). 7. M. Semeniuk and V. Tutka *Modeling and Analysis of Processes in Synchronous Generator with PWM Controlled Excitation System / Conference of Young Scientists Electric Power Engineering and Control Systems, EPECS-2015, Lviv, Ukraine, 2015, pp.186-188*. 8. R. C. Schaefer *Application of static excitation systems for rotating exciter replacement, in Proc. IEEE Pulp and Paper Industry Tech. Conf., 1997, pp. 199–208*.

УДК 621.315.1

**В. В. Кучанський**

Інститут електродинаміки НАН України  
Відділ оптимізації систем електропостачання

## **ЕКСПРЕС-ОЦІНКА РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ В АНОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

© Кучанський В. В., 2016

**Отримано емпіричну формулу для експрес-оцінки резонансних перенапруг при неповнофазному режимі повітряної лінії та складено заступну схему резонансного контуру лінії електропередачі.**

**Ключові слова:** резонансні перенапруги, аномальні режими, резонансна довжина.

**The empirical formula for rapid assessment of resonance overvoltages was received over open-phase mode and equivalent resonant circuit was composed of transmission line.**

**Key words:** resonant overvoltage, abnormal modes, resonance line.

### **Постановка проблеми і її зв'язок з важливими науковими завданнями**

Магістральні лінії електропередачі напругою 330–750 кВ є основними системоутворюючими лініями в Об'єднаній енергосистемі України та забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій, а також необхідний обмін між окремими енергосистемами. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація – важлива передумова майбутньої інтеграції Об'єднаної енергосистеми України в Європейську енергосистему. Саме тому пошкодження таких ліній чи обладнання, що забезпечує їх приєднання до енергосистеми, є важкою системною аварією, воно може викликати розпад об'єднаної системи на окремі частини, в яких буде наявний дефіцит чи