

УДК 621.313.333

### АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ФАЗОВИМ КОМПАУНДУВАННЯМ

**А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, А. А. Євченко**

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна. E-mail: andrii.s.kutsyk@lpnu.ua, mykola.semenyuk@gmail.com

**В. В. Тутка**

Бурштинська ТЕС

м. Бурштин, Івано-Франківська область, 77112, Україна. E-mail: TutkaVV@dtek.com

Запропоновано математичну модель електротехнічної системи із синхронним генератором та фазовим компаундуванням з різними регуляторами збудження. За допомогою використання математичної моделі проведено дослідження режимів зміни активної й реактивної потужності на виході синхронного генератора та виконано порівняльний аналіз статичних і динамічних показників регулювання напруги генератора для випадків використання автоматичних регуляторів збудження сильної дії та підпорядкованого типу. Результати дослідження показали, що використання в системах збудження синхронних генераторів контуру фазового компаундування дає змогу покращити якість регулювання напруги, зокрема у випадку різких змін навантаження. Застосування систем підпорядкованого регулювання збудження з ПІ-регулятором напруги забезпечує відсутність статичної похибки регулювання напруги. Автоматичні регулятори збудження сильної дії забезпечують краще демпфування коливань у перехідних режимах.

**Ключові слова:** синхронний генератор, автоматичний регулятор збудження, фазове компаундування, математична модель.

### АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ФАЗОВЫМ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ

**А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, А. А. Евченко**

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина. E-mail: andrii.s.kutsyk@lpnu.ua, mykola.semenyuk@gmail.com

**В. В. Тутка**

Бурштынская ТЭС

г. Бурштын, Ивано-Франковская область, 77112, Украина. E-mail: TutkaVV@dtek.com

Предложена математическая модель электротехнической системы с синхронным генератором и фазовым компаундированием с различными регуляторами возбуждения. С помощью использования математической модели проведено исследование режимов изменения активной и реактивной мощности на выходе синхронного генератора и выполнен сравнительный анализ статических и динамических показателей регулирования напряжения генератора для случаев использования автоматических регуляторов возбуждения сильного действия и подчиненного типа. Результаты исследования показали, что использование в системах возбуждения синхронных генераторов контура фазового компаундирования позволяет улучшить качество регулирования напряжения, в частности, в случае резких изменений нагрузки. Применение систем подчиненного регулирования возбуждения с ПИ-регулятором напряжения обеспечивает отсутствие статической ошибки регулирования напряжения. Автоматические регуляторы возбуждения сильного действия обеспечивают лучшее демпфирование колебаний в переходных режимах.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, автоматический регулятор возбуждения, фазовое компаундирование, математическая модель.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Основним завданням системи автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів є забезпечення необхідної якості регулювання напруги на шинах синхронного генератора (СГ) у широкому діапазоні зміни величини й характеру навантаження та регулювання реактивної потужності синхронного генератора [1, 2]. Для СГ, що працюють паралельно з мережею, система збудження забезпечує не лише необхідну якість регулювання напруги та реактивної потужності, але й стійкість роботи СГ в енергосистемі, а також необхідні умови роботи всієї електроенергетичної системи. Зважаючи на значний обсяг завдань, покладених на систему збудження генераторів, структуру систем регулювання збудження (автома-

тичних регуляторів збудження АРЗ) часто розділяють на дві складові – автоматичний регулятор напруги (АРН), функцією якого є регулювання напруги на виході генератора, та системний стабілізатор, який використовується для генераторів, що працюють паралельно в енергосистемі й який забезпечує стійкість роботи генератора в енергосистемі та демпфує коливання потужності на виході генератора.

З урахуванням відповідальності завдань, які вирішують системи збудження генераторів, задача синтезу систем автоматичного регулювання збудження, покращення якості регулювання основних координат генератора є актуальною науково-практичною задачею.

В електротехнічних системах із СГ та контуром

компаундування використовується комбінований спосіб регулювання збудження: як за збуджуючою дією, так і за відхиленням від заданого значення [3]. Регулювання за збудженням здійснює контур компаундування, а за відхиленням – система регулювання з автоматичним регулятором збудження. Такі системи ще називають системами змішаного збудження, оскільки струм збудження є функцією і напруги, і струму статора генератора. Контур компаундування, який частково компенсує реакцію якоря СГ, часто доповнює класичні варіанти систем збудження, зокрема: статичні, в яких струм збудження СГ регулюється тиристорним перетворювачем, і електромашинні, в яких збудження СГ здійснюється від безщіткового збудника (з незалежним збудженням або із самозбудженням) [4, 5].

Відомі системи збудження СГ зі струмовим та фазовим компаундуванням [1, 6–11].

У системах зі струмовим компаундуванням (рис. 1) струм збудження СГ формується безпосередньо під впливом струму статора генератора та є алгебраїчною сумою струму діодного випрямляча В1 і струму діодного випрямляча В2 (струму компаундування). Реалізацію контуру компаундування виконано за допомогою силових трансформаторів струму й діодного випрямляча В2.

У подібних схемах ефект компенсації реакції якоря не проявляється повною мірою, особливо при завантаженні реактивною потужністю. Це пояснюється тим, що додавання струмів паралельного й послідовного трансформаторів відбувається на стороні постійного струму та є арифметичним (без урахування фази) [1].

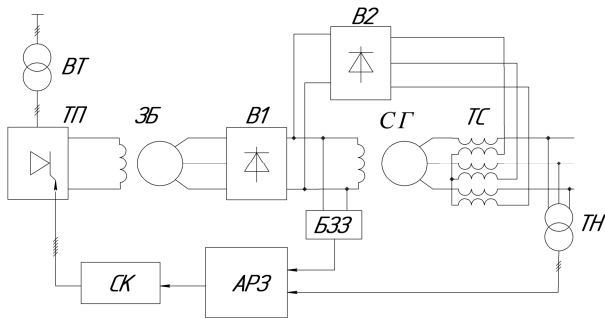


Рисунок 1 – Безщіткова система збудження синхронного генератора зі струмовим компаундуванням: ЗБ – безщітковий збудник;

В1, В2 – діодні випрямлячі; ВТ – вхідний трансформатор; СГ – синхронний генератор; ТН – трансформатор напруги; ТС – трансформатори струму; ТП – тиристорний перетворювач; СК – система імпульсно-фазового керування; АРЗ – автоматичний регулятор збудження; БЗЗ – блок зворотних зв'язків за напругою й струмом збудження

Цього недоліку позбавлені системи збудження СГ із фазовим компаундуванням (ФК) (рис. 2), в яких під час компенсації реакції якоря враховується фазове зміщення між струмом і напругою, тобто характер навантаження СГ [4–6, 9, 11].

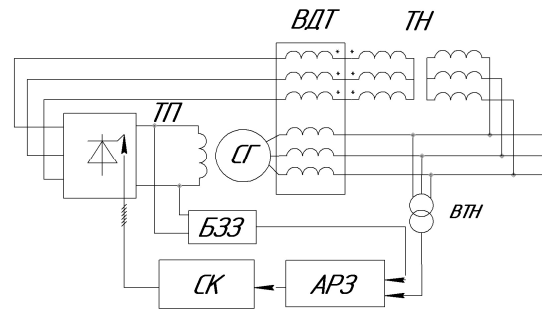


Рисунок 2 – Система генерування електроенергії синхронною машиною з ФК: ВДТ – вольтдодавальної трансформатор; БЗЗ – блок зворотних зв'язків за напругою і струмом збудження; АРЗ – автоматичний регулятор збудження; ТП – тиристорний перетворювач; СК – система імпульсно-фазового керування тиристорного перетворювача

Системи збудження СГ з ФК широко використовують у статичних системах збудження дизель-генераторів, судових СГ.

Особливість таких систем полягає в тому, що струм збудження СГ формується під впливом геометричного сумування струмів та напруг, які є пропорційними, відповідно, струму та напрузі на виході СГ. У системах ФК із послідовним з'єднанням трансформаторів використовуються вольтдодавальної трансформатори (ВДТ). У таких схемах має місце сумування вторинної напруги трансформатора напруги, що пропорційна напрузі генератора, та вторинної напруги ВДТ, що пропорційна струму генератора.

Використання комбінованого принципу автоматичного регулювання напруги СГ покращує якість регулювання в режимах різких змін навантаження генератора та при короткому замиканні на його виході [12].

На сьогодні більшість генераторів на електростанціях України та країн колишнього СРСР обладнані системами збудження з автоматичними регуляторами збудження сильної дії [13]. Такі регулятори реалізують пропорційно-диференціальний закон регулювання напруги зі стабілізацією режиму з використанням зворотних зв'язків за похідною струму збудження, а також за частотою й похідною частоти напруги на виході генератора. Вихідний сигнал такого регулятора визначається за виразом

$$\Delta U_{ARZ} = -(K_{0u} + pK_{1U})\Delta U_g - K_{1I}pI_f + (K_{0f} + pK_{1f})\Delta f, \quad (1)$$

де  $\Delta U_g$  – відхилення напруги генератора від заданого значення;  $I_f$  – струм збудження генератора;  $\Delta f$  – відхилення частоти на виході генератора від номінального значення.

Статизм регулювання напруги в системах із таким регулятором визначається коефіцієнтом підсилення за напругою  $K_{0U}$  і для забезпечення необхідної точності підтримання напруги генератора необхідно встановлювати значні значення цього коефіцієнта.

На деяких електростанціях України сьогодні впроваджуються автоматичні регулятори збудження підпорядкованого типу, які реалізують пропорційно-інтегральний або пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання напруги генератора й містять внутрішній контур регулювання струму збудження генератора, підпорядкований контуру регулювання напруги [14]. Структурна схема такого АРЗ, який також забезпечує обмеження струму збудження СГ у перехідних режимах, показана на рис. 3.

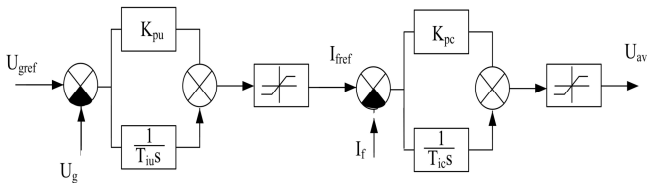


Рисунок 3 – Структура системи підпорядкованого регулювання збудження СГ:  $U_{gref}$ ,  $U_g$  – задане й поточне значення напруги статора синхронного генератора;  $I_{fref}$ ,  $I_f$  – задане й поточне значення струму збудження синхронного генератора;  $K_{pu}$ ,  $T_{iu}$  – коефіцієнт підсилення та стала часу ПІ-регулятора напруги;  $K_{pc}$ ,  $T_{ic}$  – коефіцієнт підсилення та стала часу ПІ-регулятора струму збудження;  $U_{avr}$  – сигнал керування тиристорним перетворювачем у системі збудження

Завдання розробки нових та модернізації існуючих систем збудження СГ із ФК вимагає проведення досліджень режимів роботи систем генерування електроенергії. У багатьох випадках для аналізу динамічних характеристик та синтезу системи автоматичного регулювання збудження використовують спрощені лінеаризовані математичні моделі, зокрема описані в [13]. Проте такі моделі, внаслідок нелінійності об'єкту регулювання, яким є СГ із напівпровідниковою системою збудження, не забезпечують отримання адекватного результату для всіх режимів роботи СГ, у тому числі й аварійних, які характеризуються значним діапазоном зміни координат. Натомість такі дослідження доцільно проводити за допомогою математичних моделей, що враховують нелінійність синхронної машини, вплив демпферних контурів, дискретність вентилів напівпровідникових перетворювачів.

Метою дослідження є проведення аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів у системах генерування електроенергії синхронними машинами з контуром ФК і застосуванням автоматичних регуляторів збудження сильної дії та підпорядкованого типу в режимах зміни величини й характеру навантаження СГ, сформулювати рекомендації щодо застосування автоматичних регуляторів збудження СГ у взаємодії з контуром ФК.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

*Принципи побудови математичної моделі*

Математичну модель розроблено на основі теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем [15] шляхом об'єднання об'єктно-

орієнтованих моделей типових елементів (рис. 4): синхронної машини СМ; мережі МЕР; трансформатора ТР; катодної й анодних вентильних груп АВГ і КВГ тиристорного перетворювача; RL-ланок з ЕРС; системи керування.

Кожний елемент надається багатополосником і описується векторним рівнянням виду (2):

$$p\vec{i}_e + \vec{G}_e \vec{\varphi}_e + \vec{C}_e = 0, \tag{2}$$

де  $\vec{\varphi}_e$  – вектор потенціалів зовнішніх полюсів багатополосника;  $\vec{i}_e$  – вектор потенціалів зовнішніх віток багатополосника;  $\vec{G}_e, \vec{C}_e$  – матриця (n×n) і вектор розмірності n, які визначаються параметрами елемента; p – оператор диференціювання по часу.

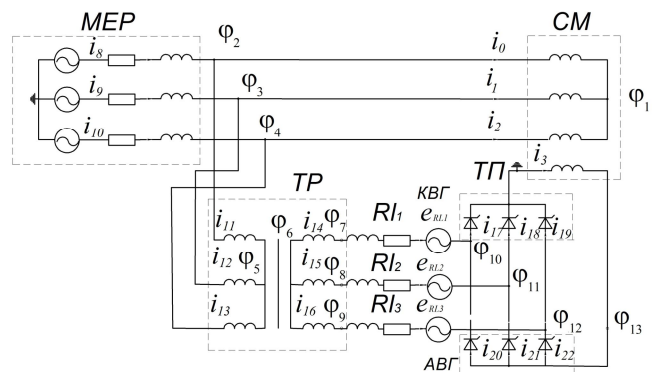


Рисунок 4 – Розрахункова схема силової частини системи генерування електроенергії синхронною машиною з фазовим компаундуванням

Під час формування розрахункової схеми зовнішні вітки багатополосників з'єднуються між собою у вузлах системи. Зв'язок між вектором потенціалів полюсів електричного багатополосника  $\vec{\varphi}_e$  та вектором потенціалів незалежних вузлів  $\vec{\varphi}_c$  системи описується рівнянням

$$\vec{\varphi}_e = \vec{\Pi}^T \vec{\varphi}_c, \tag{3}$$

де  $\vec{\Pi}^T$  – матриця інцидентії, яка визначає спосіб під'єднання зовнішніх віток елемента до незалежних вузлів системи.

Для визначення потенціалів незалежних вузлів системи  $\vec{\varphi}_c$  використовується векторне алгебраїчне рівняння виду

$$\vec{G}_c \vec{\varphi}_c + \vec{C}_c = 0, \tag{4}$$

де  $\vec{G}_c, \vec{C}_c$  – відповідно матриця і вектор коефіцієнтів, які визначаються так:

$$\vec{G}_c = \sum_{j=1}^L \vec{\Pi}_j \vec{G}_{ej} \vec{\Pi}_j^T; \vec{C}_c = \sum_{j=1}^L \vec{\Pi}_j \vec{C}_{ej}, \tag{5}$$

де  $\vec{G}_{ej}, \vec{C}_{ej}$  – коефіцієнти векторного рівняння виду (2) для j-го структурного елемента; L – кількість елементів у складі системи.

Алгоритм математичного моделювання є таким. На основі коефіцієнтів зовнішніх векторних рівнянь виду (2) всіх структурних елементів, що вхо-

дять до складу системи, та їх матриць інцидентій формуємо рівняння (4), з якого визначаємо значення потенціалів незалежних вузлів системи. Для кожного структурного елемента системи з рівняння виду (3) визначаємо значення потенціалів зовнішніх полюсів і з рівняння виду (2) – похідні струмів зовнішніх віток. Далі, шляхом чисельного інтегрування, визначаємо струми зовнішніх віток багатополіусників, а також інші змінні. Змінні, які описують електричний багатополіусник і не є струмами зовнішніх віток (якщо такі є), визначаємо з внутрішніх рівнянь електричного багатополіусника.

Математична модель синхронної машини, як багатополіусника згідно з обраним методом моделювання, описана в [16]. Дана модель побудована у фазних координатах і враховує нелінійність характеристики намагнічування магнітопроводу, вплив демпферної системи ротора, а також дає змогу дослідити несиметричні режими роботи.

Вентильні перетворювачі в математичній моделі розглядаються як схеми з постійною структурою та змінними параметрами, причому кожний вентиль перетворювача подається послідовно-з'єднаним активним опором та індуктивністю, що приймають малі значення у відкритому стані вентилів й великі – в закритому. Закривання вентилів здійснюється в момент часу, коли його струм переходить через 0 з додатного у від'ємне значення (ці моменти розраховуються в моделі). Моменти відкривання вентилів визначаються з логічних рівнянь, які описують систему керування вентильними перетворювачами. Такі допущення дозволяють урахувати комутаційні процеси в перетворювачі, дослідити реальні форми напруг та струмів у системі збудження, дослідити вплив несправності вентилів на роботу системи генерування електроенергії.

Реалізація контуру ФК у математичній моделі здійснюється послідовним ввімкненням до вторинних обмоток вхідного трансформатора напруги трьох RL-ланок з ЕРС, ЕРС яких визначаються на основі струмів статора СГ за наступними виразами:

$$e_{R11} = k_n \frac{1}{k_k} (i_{sd} \cos(\gamma + \frac{\pi}{2})) + i_{sq} \sin(\gamma + \frac{\pi}{2});$$

$$e_{R12} = k_n \frac{1}{k_k} (i_{sd} \cos(\gamma + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3})) + i_{sq} \sin(\gamma + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}); \quad (6)$$

$$e_{R13} = k_n \frac{1}{k_k} (i_{sd} \cos(\gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3})) + i_{sq} \sin(\gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}),$$

де  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  – струми статора СГ по осям  $d$  та  $q$ ;  $k_k$  – коефіцієнт компаундування, який визначається електромагнітними параметрами ВДТ (А/В);  $\gamma$  – кут між віссю  $d$  та віссю фази  $A$  (кут повороту ротора);  $k_n$  – коефіцієнт, що визначає спосіб під'єднання вторинних обмоток ТН і ВДТ ( $k_n=1$  – узгоджене,  $k_n=-1$  – зустрічне).

Параметри генераторної установки з ФК, яка досліджувалася, є такими. Для синхронного турбогенератора (типу ТГВ-200-2МУ3):  $P_{ном} = 210$  МВт; номінальна напруга та струм  $U_{ном} = 15750$  В;  $I_{ном} = 9060$  А; струм збудження неробочого ходу

$i_{fn.x.} = 715$  А; номінальний струм збудження  $i_{fn.x.} = 1945$  А; активні опори обмоток статора та збудження  $r_{cm} = 0,0024$  Ом,  $r_f = 0,174$  Ом; індуктивні опори  $X_d = 1,997$  в.о.,  $X_{ad} = 1,723$  в.о.,  $X'_d = 0,34$  в.о.,  $X''_d = 0,223$  в.о. Кількість пар полюсів  $p_0 = 1$ . Момент інерції агрегату  $18500$  кг·м<sup>2</sup>. Для ТН типу ТСЗП-3000/20 ВУ3:  $S_{ном} = 2540$  кВА; номінальні напруги первинної і вторинної обмоток  $U_{1н} = 15750$  В,  $U_{2н} = 455$  В. Для ВДТ – коефіцієнт компаундування  $k_k = 15$  А/В, зустрічне під'єднання вторинних обмоток ТН і ВДТ.

*Результати математичного моделювання*

Результати математичного моделювання електротехнічної системи із СГ та ФК з використанням автоматичних регуляторів сильної дії та підпорядкованого типу зображено на рис. 5–10.

У режимі вмикання СГ у мережу з одночасним завантаженням активною потужністю (85 % від номінального значення) (рис. 8,а), що відбувається на 13 с, система підпорядкованого регулювання збудження з ПІ-регулятором напруги забезпечує нульову статичну похибку регулювання напруги (рис. 5,а, крива 2), тоді як у випадку використання АРЗ сильної дії статична похибка дорівнює 2,1 %. Зменшення цієї статичної похибки можна досягнути збільшенням коефіцієнта підсилення за напругою  $K_{OU}$ , що, однак, погіршує якісні динамічні показники регулювання.

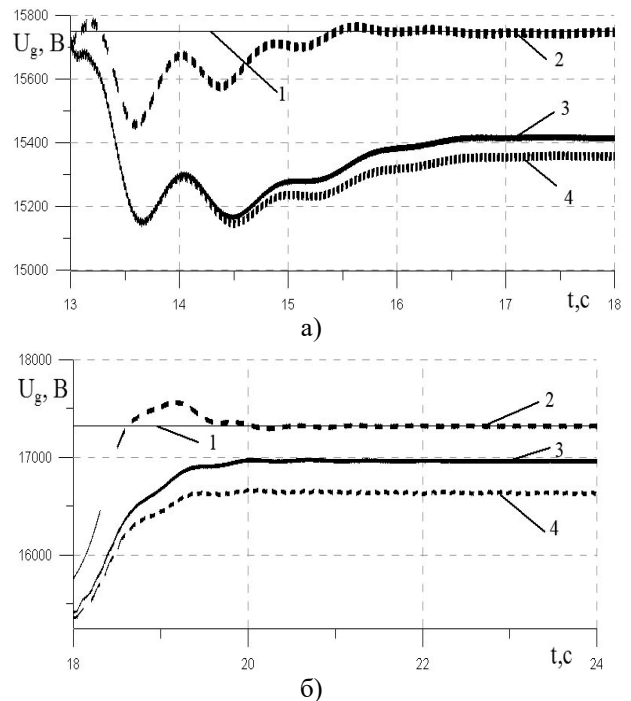


Рисунок 5 – Залежність діючого значення лінійної напруги статора СГ  $U_g$  від часу  $t$  при завантаженні генератора активною потужністю (а) та подальшим збільшенням реактивної потужності (б): задане значення (пряма 1); АРЗ підпорядкованого типу з ФК (крива 2); АРЗ сильної дії з ФК (крива 3) та АРЗ сильної дії без ФК (крива 4)

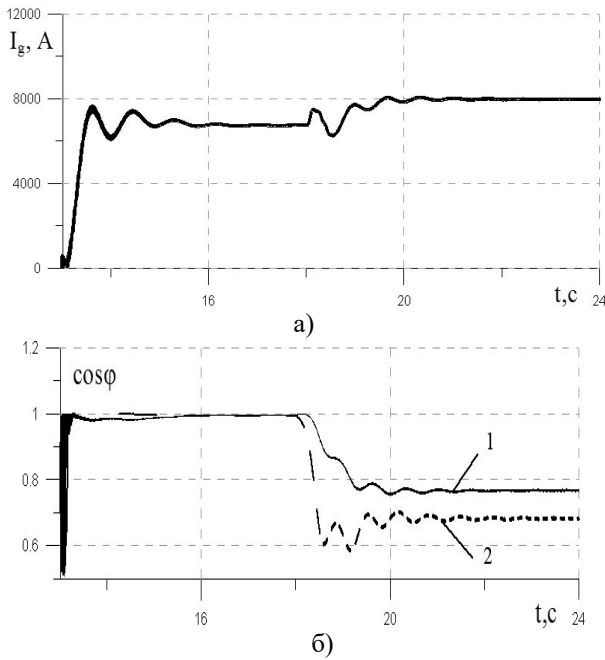


Рисунок 6 – Залежність діючого значення струму статора  $I_g$  (а) та  $\cos\varphi$  (б) СГ від часу  $t$  при завантаженні генератора активною потужністю та подальшому збільшенню реактивної потужності: АРЗ сильної дії з ФК (крива 1) та АРЗ підпорядкованого типу з ФК (крива 2)

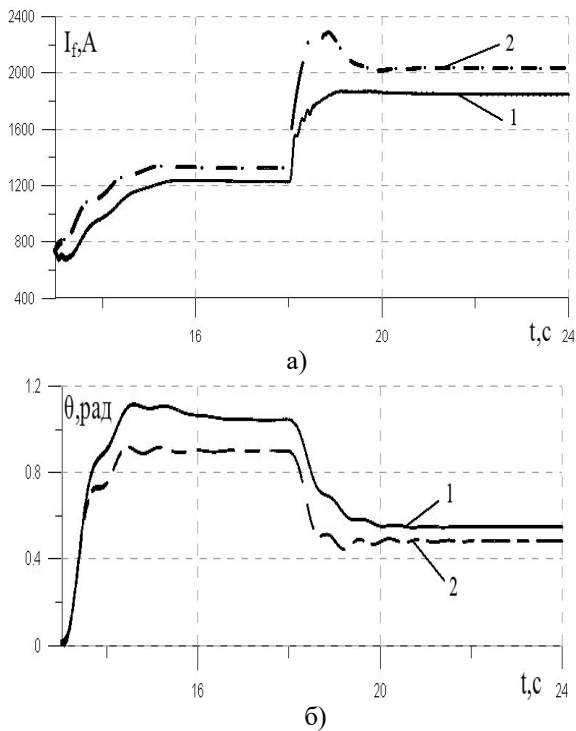


Рисунок 7 – Залежність струму збудження  $I_f$  (а) та кута навантаження  $\theta$  (б) СГ від часу  $t$  при завантаженні генератора активною потужністю та подальшому збільшенню реактивної потужності: АРЗ сильної дії з ФК (крива 1) та АРЗ підпорядкованого типу з ФК (крива 2)

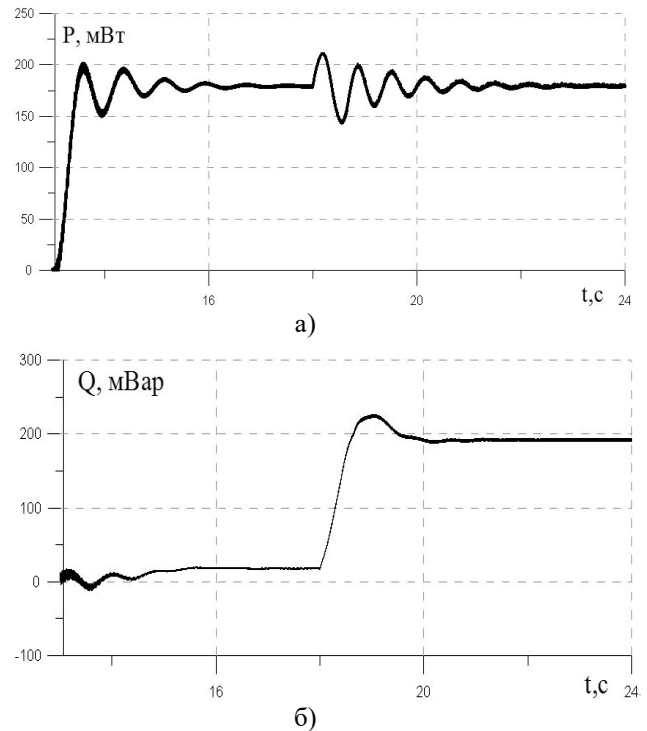


Рисунок 8 – Залежність активної  $P$  (а) та реактивної  $Q$  (б) потужності синхронного генератора з АРЗ підпорядкованого типу та ФК від часу  $t$

Водночас АРЗ сильної дії забезпечує краще демпфування коливань напруги в перехідному режимі, що пояснюється наявністю в каналах регулювання напруги диференціальної складової, а також наявністю гнучкого зворотного зв'язку за струмом збудження генератора (рівняння (1)). Час регулювання напруги статора СГ у системі з таким регулятором є в 1,07 рази меншим порівняно із системою з автоматичним регулятором збудження підпорядкованого типу.

Формування струму збудження (рис. 7, крива 2) у такій системі забезпечують одночасно діями контуру ФК, який забезпечує форсування вхідної напруги тиристорного перетворювача у випадку накиду навантаження, та автоматичного регулятора підпорядкованого типу.

У режимі збільшення реактивної потужності на виході синхронного генератора (відбувається на 18 с (рис. 8,б)) шляхом збільшення заданого значення напруги генератора, система підпорядкованого регулювання з ПІ-регулятором напруги забезпечує відсутність статичної похибки регулювання, відтак, вище значення напруги генератора та більше значення реактивної потужності (нижчий коефіцієнт потужності в статорі (рис. 6,б)). При цьому меншим є кут навантаження генератора (рис. 7,б). Водночас демпуючі властивості є кращими в системі з регулятором сильної дії, де відсутнє перерегулювання за струмом збудження та напругою генератора. Статична похибка регулювання напруги в такій системі становить 1,58 %. Час регулювання напруги статора СГ у системі з автоматичним регулятором сильної дії є в 1,2 рази меншим.

Вплив налаштування регуляторів напруги та струму збудження на якість регулювання напруги в системі підпорядкованого регулювання проілюстровано осцилограмами на рис. 9, 10, на яких показано результати дослідження вищеписаних режимів завантаження генератора активною та реактивною потужністю за умов зміни коефіцієнта підсилення регулятора напруги  $K_{pu}$  та коефіцієнта підсилення регулятора струму збудження  $K_{pc}$ . Якість перехідного процесу в цьому випадку значною мірою залежить від загального коефіцієнту підсилення по каналу регулювання напруги, який є добутком коефіцієнтів підсилення регуляторів напруги та струму збудження:  $K_u = K_{pu}K_{pc}$ . Крива 1 на цих рисунках відповідає найкращому налаштуванню регуляторів.

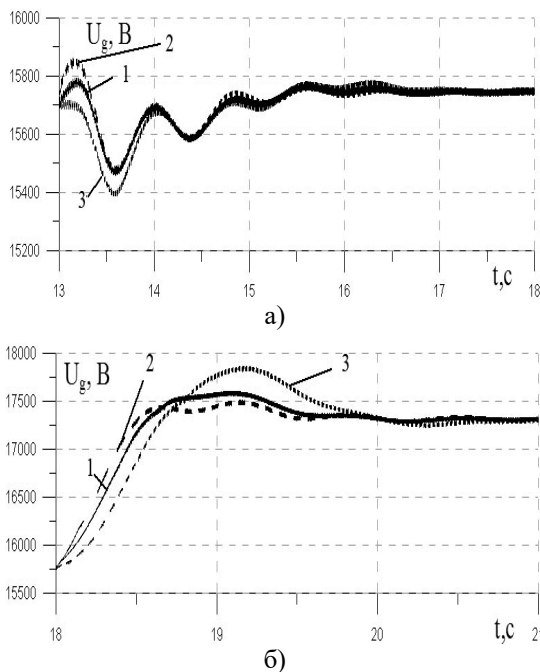


Рисунок 9 – Залежність діючого значення лінійної напруги статора СГ  $U_g$  від часу  $t$  при завантаженні генератора активною потужністю (а) та подальшим збільшенням реактивної потужності (б) у системі з АРЗ підпорядкованого типу при зміні коефіцієнта підсилення по каналу регулювання напруги СГ:  $K_u = 50$  (крива 1),  $K_u = 500$  (крива 2),  $K_u = 25$  (крива 3)

Як видно з отриманих результатів, збільшення коефіцієнта підсилення по каналу регулювання напруги збільшує швидкодію регулювання, однак збільшує коливність та перерегулювання (крива 2).

Суттєве зменшення коефіцієнта підсилення збільшує час регулювання та призводить до перерегулювання, обумовленого зростаючим впливом інтегральної складової (крива 3).

**ВИСНОВКИ.** Використання в системах збудження синхронних генераторів контуру компаундування дає змогу покращити якість регулювання, особливо у випадку різких змін навантаження. Ная-

вність такого контуру в системі збудження полегшує регулювання напруги генератора, зменшує різницю в якості регулювання напруги при використанні регуляторів збудження різного типу, а також зменшує вплив налаштування регуляторів на якісні показники регулювання. Це дає змогу підвищити нечутливість системи регулювання до параметричних змін об'єкту регулювання, яким у даному випадку є працюючий у мережі синхронний генератор.

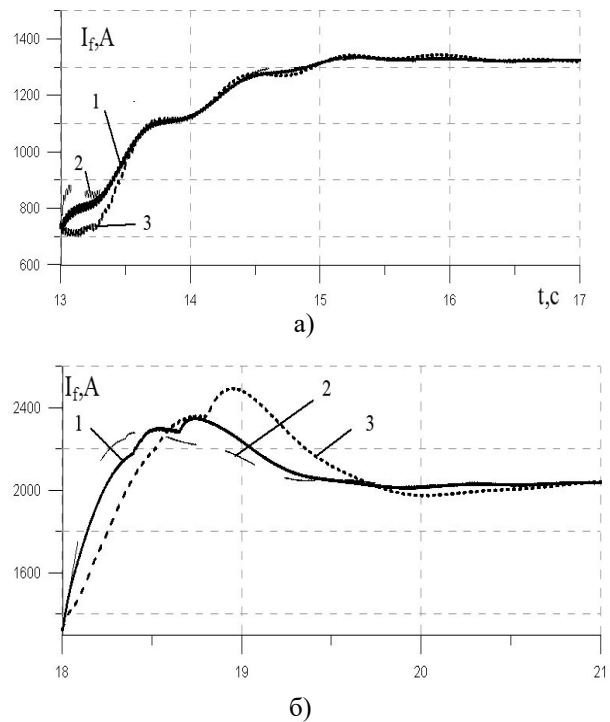


Рисунок 10 – Залежність струму збудження СГ  $I_f$  від часу  $t$  при завантаженні генератора активною потужністю (а) та подальшим збільшенням реактивної потужності (б) у системі з АРЗ підпорядкованого типу при зміні коефіцієнта підсилення по каналу регулювання напруги СГ:  $K_u = 50$  (крива 1),  $K_u = 500$  (крива 2),  $K_u = 25$  (крива 3)

Позитивною рисою систем підпорядкованого регулювання збудження з ПІ-регулятором напруги є відсутність статичної похибки регулювання напруги. Водночас автоматичні регулятори збудження сильної дії забезпечують краще демпфування коливальних у перехідних режимах. Перевагою систем підпорядкованого регулювання збудження є також простіша структура, а, відтак, і простіша технічна реалізація та налагодження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Anderson P.M., Fouad A.A. Power system control stability // Institute of Electrical and Electronics Engineering. – New York, 1994. – 464 p.
2. Thyristor Excitation System // Siemens AG Power Generation. – Manual, 2003. – 20 p. – Available at: [http://voith.com/en/t3387\\_e\\_Thyristor\\_screen.pdf](http://voith.com/en/t3387_e_Thyristor_screen.pdf)

3. Утляков Г.Н., Куляпин В.М. и др. Комбинированные системы регулирования напряжения синхронных генераторов. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 224 с.

4. Compound excitation system for synchronous generators // Siemens AG Power Generation. – Manual, 2004. – 11 p. – Available at: [https://www.siemens.com.tr/i/content/3882\\_1\\_ThyripartCatalogue.pdf](https://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ThyripartCatalogue.pdf)

5. Estes J., Shafer R. Retrofitting SCT/PPT excitation systems with digital control // Pulp and Paper Industry Technical Conference. – 2002. – PP. 98–110.

6. Arrillaga J., Macdonald S., Watson N.R. et al. Direct connection of series self-excited generators and HVDC converters // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Iss. 8 (4). – PP. 1860–1866.

7. Qi-jun P., Huai-liang Z., Xiang-ming Z. et al. High frequency EMI of the phase compound excitation system of 3-phase synchronous generator // Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering. – 2009. – Iss. 29 (30). – PP. 110–115.

8. Black start power plant replaces obsolete compound excitation system with new static exciter bus fed system // Basler Electric Power Systems Group. – 2010. – 4 p.

9. Schaefer R.C. Application of static excitation systems for rotating exciter replacement // Pulp and Paper Industry Technical Conference, Annual Volume. – 16–20 Jun. 1997. – PP. 199–208.

10. Jordan R., Schaefer R., Estes J. et al. Selecting

the excitation system for the additional turbine generator at the Port Wentworth pulp mill // Pulp and Paper Industry Technical Conference, Annual Volume. – 27 June–1 July 2004. – PP. 102–110.

11. Семенюк М.Б. Генераторна установка з фазовим компаундуванням: матеріали міжнар. конф. «Енергетика та системи керування ЕРЕС–2010», 25–27 листоп. 2010 р. – Л., 2010. – С. 36–37.

12. Куцик А.С., Семенюк М.Б. Аналіз режимів коротких замикань в установці генерування електроенергії синхронним генератором з фазовим компаундуванням // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Електромеханічні та електроенергетичні системи». – 2011. – Вип. 707. – С. 68–73.

13. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.

14. Куцик А.С., Тутка В.В. Математичне моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів в статичній системі збудження турбогенератора Бурштинської ТЕС // Енергетика та електрифікація. – 2008. – Вип. 11. – С. 30–35.

15. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львів: видавництво при Львівському університеті «Вища школа», 1986. – 161 с.

16. Куцик А.С. Об'єктно-орієнтована математична модель синхронної машини // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 120–129.

#### AUTOMATIC EXCITATION REGULATION OF PHASE COMPOUND SYNCHRONOUS GENERATOR

**A. Kutsyk, M. Semenyuk, A. Yevchenko**

National University "Lviv Polytechnic"

Vul. S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: andrii.s.kutsyk@lpnu.ua, mykola.semenyuk@gmail.com

**V. Tutka**

Burshtyn Power plant

m. Burshtyn, Ivano-Frankivsk region, 77112, Ukraine. E-mail: TutkaVV@dtel.com

**Purpose.** The problem of synthesis of automatic excitation controllers, improve the quality of the synchronous generator voltage regulation requires to make research and analysis of static and dynamic performance of generator voltage regulation. **Methodology.** We have applied the mathematical simulation of generator with phase compound excitation system and different automatic excitation regulators (strong action and PI voltage controller) in modes of active and reactive power loading of synchronous generator. **Results.** The usage of compound excitation system of synchronous generators provides the improvement of the voltage regulation quality, especially in the case of sudden load changes. The presence of compound circuit in the excitation system facilitates excitation voltage regulation, reduces the difference of voltage regulation quality, using excitation controllers of various types, and also reduces the influence of setting regulators on regulation quality. This allows increasing of the insensitivity of the regulator for parametric changes of the synchronous generator. A positive feature of the compound excitation system with PI voltage controller is an absence of a voltage regulation static error. However, the automatic excitation regulator of strong action provides better damping of oscillations in transient modes. The advantages of compound excitation system with PI voltage controller are, also, simpler structure, technical implementation and debugging. **Originality.** The mathematic model of generator with phase compound excitation system and different automatic excitation regulators was proposed for research and analysis of static and dynamic performance of generator voltage regulation. References 16, figure 10.

**Key words:** excitation system, phase compound, synchronous generator, closed loop system, automatic voltage regulator, PI voltage controller, mathematical model.

#### REFERENCES

1. Anderson, P.M. and Fouad, A.A. (1994), Power system control stability, *Institute of Electrical and Electronics Engineering*, New York, USA.

2. Thyristor Excitation System (2003), *Siemens AG Power Generation*, Manual, Available at: [http://voith.com/en/t3387\\_e\\_Thyristor\\_screen.pdf](http://voith.com/en/t3387_e_Thyristor_screen.pdf)

3. Utliakov, H.N., Kuliapin, V.M. et al. (1998), *Kombinirovannyye sistemy regulirovaniya napryazheniya sinkhronnykh generatorov* [Combine systems of synchronous generators voltage regulation], Moscow. (in Russian)
4. Compound excitation system for synchronous generators (2004), *Siemens AG Power Generation, Manual*, Available at: [https://www.siemens.com.tr/i/content/3882\\_1\\_ThyripartCatalogue.pdf](https://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ThyripartCatalogue.pdf).
5. Estes, J. and Shafer, R. (2002), "Retrofitting SCT/PPT excitation systems with digital control", *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 98–110.
6. Arrillaga, J., Macdonald, S., Watson, N.R. et al. (1993), "Direct connection of series self-excited generators and HVDC converters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, no. 4, pp. 1860–1866.
7. Qi-jun, P., Huai-liang, Z., Xiang-ming, Z. et al. (2009), "High frequency EMI of the phase compound excitation system of 3-phase synchronous generator", *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, Vol. 29, no. 30, pp. 110–115.
8. "Black start power plant replaces obsolete compound excitation system with new static exciter bus fed system" (2010), *Basler Electric Power Systems Group*, 4 p.
9. Schaefer, R.C. (1997), "Application of static excitation systems for rotating exciter replacement", *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Annual Volume, 16–20 Jun. 1997, pp. 199–208.
10. Jordan, R., Schaefer, R., Estes, J. et al. (2004), "Selecting the excitation system for the additional turbine generator at the Port Wentworth pulp mill", *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Annual Volume, 27 June–1 July 2004, pp. 102–110.
11. Semenyuk, M. (2010), *Heneratorna ustanovka z fazovym kompaunduvannym* [Generator plant with compound excitation system], *EPECS-2010*, Lviv, pp. 36–37. (in Ukrainian)
12. Kutsyk, A. and Semeniuk, M. (2011), "Analysis of short circuit modes of generator plant with phase compound synchronous generator", *Visnyk NU "Lvivska politekhnika" "Elektromekhanichni ta elektroenergetychni systemy"*, Vol. 707, pp. 68–73. (in Ukrainian)
13. Yurhanov, A. and Kozhevnikov, V. (1996), *Regulirovaniye vzbuzhdeniya sinkhronnykh generatorov* [Excitation regulation of synchronous generators], Nauka, St. Petersburg. (in Russian)
14. Kutsyk, A. and Tutka, V. (2008), "Mathematical modeling of electro magnetic and electromechanical processes in static excitation system of Burshtyn generator", *Enerhetyka ta Elektryfikatsiya*, Vol. 11, pp. 30–35. (in Ukrainian)
15. Plachytyna, E. (1986), *Matematycheskoe modelirovaniye elektromashynno-ventylnykh system* [Mathematical modeling of electromechanical systems], Vyscha shkola, Lviv. (in Russian)
16. Kutsyk, A. (2005), "Object-oriented mathematical model of a synchronous machine", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 58, pp. 120–129. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 08.09.2016.