

струм зростав до 200 А, коефіцієнт несинусоїдальності значно перевищував допустиме значення ( $K_{нс} \geq 11,1\%$ ).

Таким чином, доцільно було б внести у проект наступне коректування:

1) не встановлювати фільтр Ф-3, що значно зменшило б розміри фільтрокомпенсуючого пристрою, прийнявши до уваги його малу ефективність;

2) замість фільтра Ф-11 застосувати конденсаторну батарею без захисного реактора (не змінюючи її потужність), такий варіант можливий у разі наявності фільтрів Ф-5 та Ф-7, потужна конденсаторна батарея значно зменшить рівень гармонік  $v \geq 23$ .

**Висновки.** Вказані недоліки проектування можна пояснити недостатнім обсягом попередніх експериментальних досліджень, проведених на підприємстві. Наші дослідження роботи технологічної установки [5] показали ефективну роботу фільтрокомпенсуючого пристрою у разі наявності тільки фільтрів 5-ї та 7-ї гармонік, навіть без окремої конденсаторної батареї.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – 4-е изд., перераб. и дополн. – К.: Техніка, 2000. – 231с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – К.: Техніка, 1974. – 184с.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Железко Ю.С. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 135с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
5. Хмельницький Є.Д. Експлуатаційне дослідження роботи статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності в мережі живлення агрегату «під-ковш» / Хмельницький Є.Д. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Випуск 1(26). – 373с. – С.130-137.

*Надійшла до редколегії 11.04.2017.*

УДК 621.313.322

ХОМЕНКО В.І., аспірант  
НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ЕНЕРГООБМІННІ ПРОЦЕСИ МІЖ КОНТУРАМИ АУТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Вступ.** На даний час у світовій енергетиці спостерігається зростання автономних генеруючих установок (АГУ) на базі синхронних генераторів (СГ), які є незмінним джерелом електричної енергії у малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є недоцільним, а також у місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірські місцевості, острова і т.д.) [1].

Суттєвим недоліком СГ є інерційність обмотки збудження (ОЗ).

Для підвищення стійкості автономних СГ та стабілізації вихідної напруги на застискачах статора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження та системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

Однак, при підключенні споживачів співставної потужності, наприклад, асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором СГ втрачають стійкість із-за інерційності контура збудження та значного динамічного падіння напруги, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів.

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контура збудження синхронного генератора шляхом зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур, наприклад, ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Причому вмикання ємнісних елементів можливо або послідовно з обмоткою збудження, або паралельно з ОЗ, що призводить до складних енергообмінних процесів в контурах синхронного генератора.

**Постановка задачі.** Теоретичне та експериментальне дослідження впливу параметрів ОЗ на енергообмінні процеси між контурами автономного синхронного генератора.

**Результати роботи.** Принципову схему системи збудження СГ АГУ з компенсованою ОЗ наведено на рис.1. На рис.1 позначено: ВТ – випрямляючий трансформатор; СКТ – система керування тиристорним перетворювачем ТП; ДЗН – джерело зарядної напруги; С – синхронний генератор; ДС – датчик струму; БФ – блок форсування; ТД – тепловий двигун; ТН – трансформатор напруги; ТС – трансформатор струму.

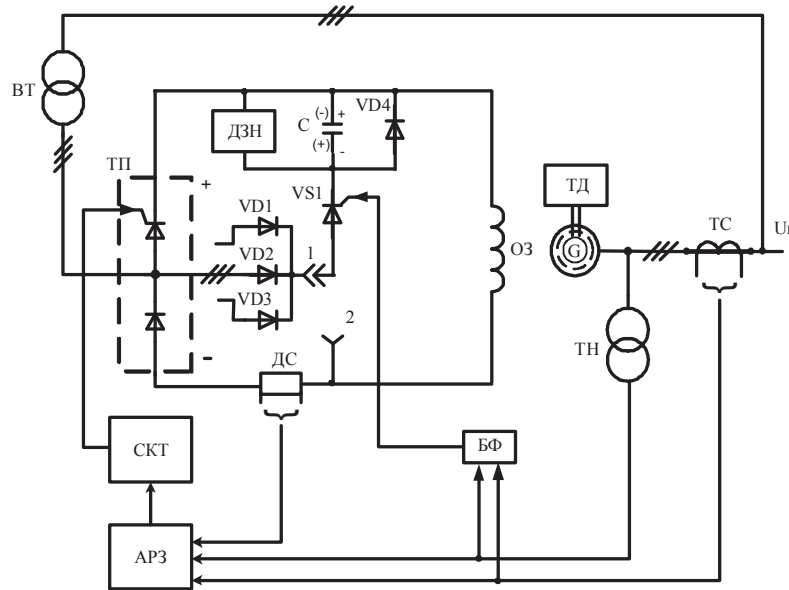


Рисунок 1 – Принципова схема системи збудження СГ

розряду конденсатора, система АРЗ встановлює необхідний рівень напруги збудження, а діод VD4 вимикає конденсатор із контура збудження.

Послідовна компенсація інерційності ОЗ забезпечується підключенням анода тиристора VS1 до клемми 1, а паралельна – до клемми 2.

При послідовній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ може бути меншою від напруги збуджувача, тому що ЄНЕ виконує роль джерела струму. При паралельній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ повинна бути більшою від форсувальної напруги

Стабілізація вихідної напруги СГ при підключенні споживачів з номінальним статичним навантаженням забезпечується системою АРЗ. При підключенні споживачів співставної потужності, що супроводжується зниженням напруги до  $0,85U_n$  або зростанням струму вище  $2I_n$ , БФ вмикає тиристор VS1, що призводить до розряду конденсатора ЄНЕ на ТП і ОЗ та компенсації інерційності ОЗ. За час, що дорівнює чверті періоду коливального

збуджувача.

У випадку лінійного електричного кола, тобто коли всі його параметри зберігають свої значення постійними незалежно від діючих в електричному колі напруг і струмів, застосовують принцип накладання.

У випадку несподіваного вмикання ЕРС ( $U_{c0}$ ) в схему, в якій вже діє одна ( $U_f$ ) або декілька ЕРС, результуючий струм дорівнює алгебраїчній сумі струмів від раніше діючих ЕРС і від тільки увімкненої.

Рівняння напруг при розряді конденсатора в контурі збудження має вигляд:

$$U_R + U_L + U_C = 0. \quad (1)$$

Виразимо всі величини через струм  $i_f$ :

$$i_f R_f + L_f p i_f + \frac{1}{cp} i_f = 0, \quad (2)$$

де  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання.

Прийmemo початкові умови:  $i_f = \frac{U_f}{R_f}$ ,  $U_c = U_{c0} \cdot e^{-\beta t}$ ,  $\beta = \frac{R_f}{2L_f}$ .

Після перетворень отримаємо залежність струму від величини напруги ЄНЕ:

$$i_f = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{cp}{L_f cp^2 + R_f cp + 1}. \quad (3)$$

Представимо ці рівняння в пакеті Matlab/Simulink (рис.2).

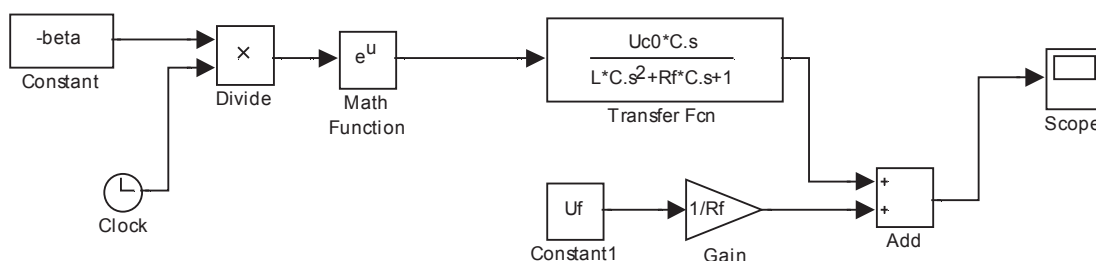
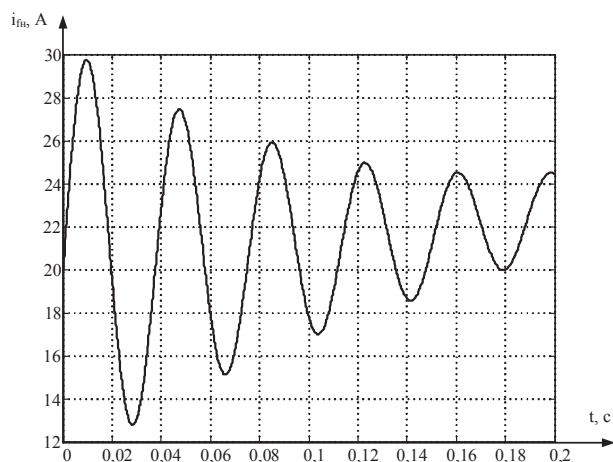


Рисунок 2 – Математична модель контуру збудження СГ при наявності струму збудження



114 Рисунок 3 – Розрахункові залежності струму збудження СГ

Розрахунок перехідних процесів виконано для синхронного генератора типу МСА-72/4:  $P_H = 12$  кВт;  $U_c = 230$  В;  $i_{1H} = 37,6$  А;  $U_{fH} = 27$  В;  $i_{fH} = 23$  А;  $n_H = 1500$  об/хв. Параметри контура збудження синхронного генератора:  $U_{c0} = 100$  В;  $L_f = 0,006$  Гн;  $C = 0,0003$  Ф;  $R_f = 1$  Ом;  $U_\phi = 20$  В;  $\beta = 8,33$ .

Результати розрахунків наведено на рис.3. Аналіз розрахункових залежностей показує, що при часі  $t_{\phi} = 0,01$  с струм  $i_{\phi}$  сягає величини 29,8 А, а при часі  $t_r = 0,02$  с струм понижується до величини 13,0 А. Визначимо величину напруги форсування:  $U_{f\phi} = i_{f\phi} \cdot R_f = 29,8 \cdot 1 = 29,8$  В.

Таким чином, можна сформулювати алгоритм керування контуром збудження: при  $t > 0$  і  $p i_f = 0$  необхідно вивести конденсатор із контура збудження, при цьому  $U_f = U_{f\phi}$  і  $X_L = X_C$ .

У випадку повної компенсації струм контура збудження буде безінерційно слідувати за напругою форсування.

Вказаний алгоритм керування контуром збудження СГ реалізовано в математичній моделі, наведений на рис.4.

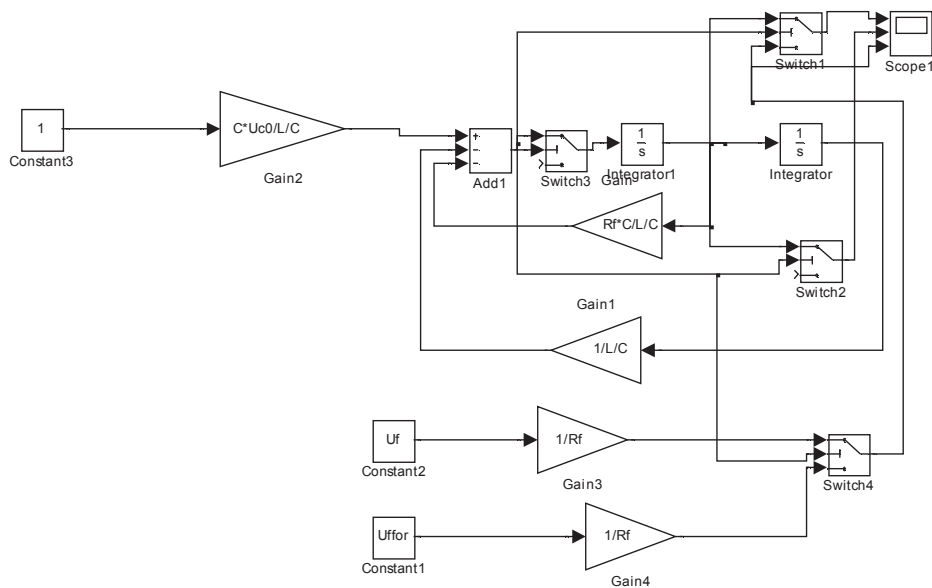


Рисунок 4 – Математична модель алгоритму керування контуром збудження СГ

Результати розрахунків з використанням методу накладання наведено на рис.5 при наступних даних:  $i_{f\phi} = i_c$  з ємністю  $C = 100-600$  мкФ при  $L = 0.006$  Гн,  $U_{c0} = 100$  В.

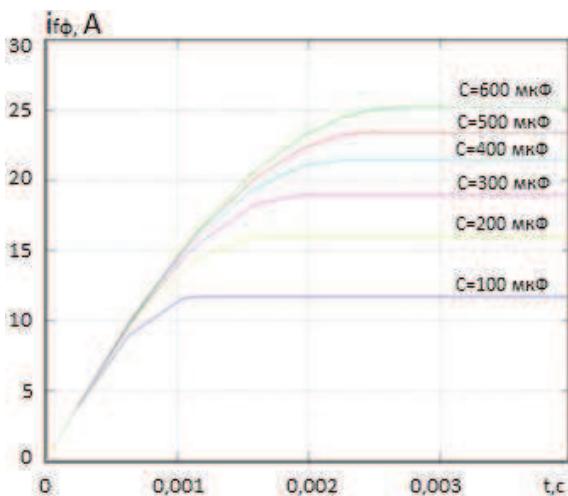


Рисунок 5 – Розрахункові залежності форсованого значення струму збудження СГ від величини ємно-

Результати теоретичних досліджень, присвячених математичному опису енергообмінних процесів між контурами СГ, висвітлені в роботах [2, 3].

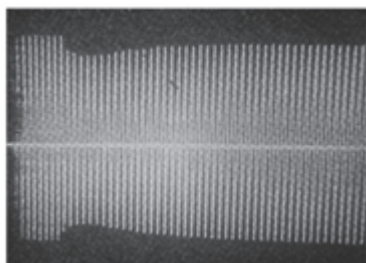
Для підтвердження ефективності впливу компенсованої системи збудження СГ на динамічну стійкість АГУ виконано експериментальні дослідження при підключенні споживачів з різним навантаженням.

Експериментальні дослідження виконано на СГ типу МСА 72/4А

потужністю 12 кВт,  $U_{1H} = 230$  В;  $i_{1НОМ} = 36,7$  А; струм ротора 23 А.

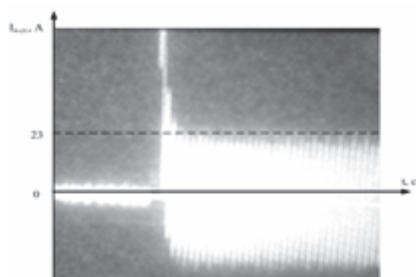
На рис.6 наведено осцилограми при підключенні статичного навантаження з некомпенсованим контуром збудження СГ, а на рис.7 – осцилограми з паралельно компенсованим контуром збудження.

Напряга статора  $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$  В



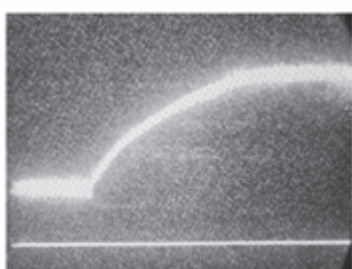
$\Delta U_r = 16\%$ ;  $t_{cмаб} = 1c$

Струм статора



$I_{cm} = \sqrt{2} \cdot 23A$

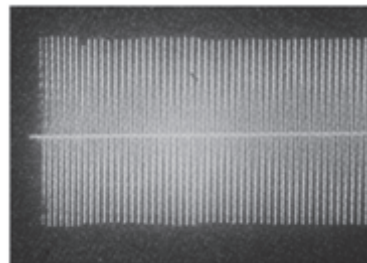
Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13A$ ;  $I_{f_{фор}} = 65A$

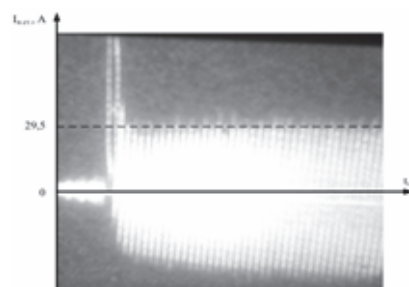
Рисунок 6 – Режим підключення статичного навантаження з некомпенсованим контуром збудження

Напряга статора  $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$  В



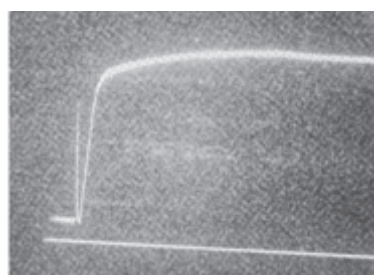
$\Delta U_r = 3\%$ ;  $t_{cмаб} = 0,1c$

Струм статора



$I_{cm} = \sqrt{2} \cdot 29,5A$

Струм збудження

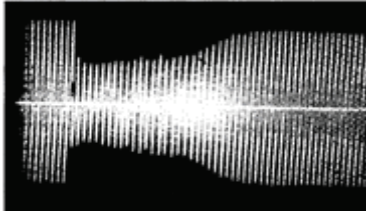


$I_{f_{поч}} = 13A$ ;  $I_{f_{фор}} = 65A$

Рисунок 7 – Режим підключення статичного навантаження з паралельно компенсованим контуром збудження

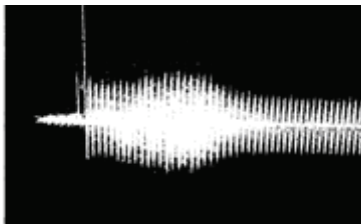
На рис.8 наведено осцилограми при підключенні АД потужністю 11 кВт до СГ з некомпенсованим контуром збудження, а на рис.9 – осцилограми з послідовно компенсованим контуром збудження.

Напряга статора  $U_r = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ В}$



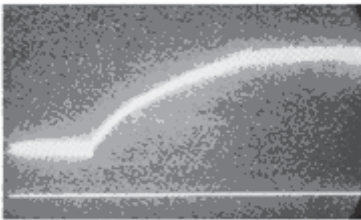
$\Delta U_r = 39\%$ ;  $t_{stab} = 1,2 \text{ с}$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36 \text{ А}$ ;  $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70 \text{ А}$

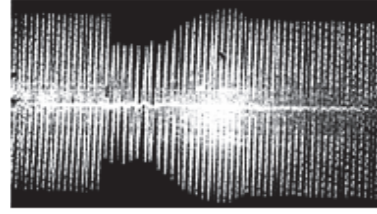
Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13 \text{ А}$ ;  $I_{f_{фор}} = 117 \text{ А}$

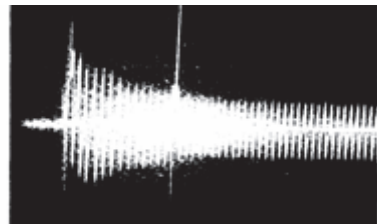
Рисунок 8 – Режим підключення АД з некомпенсованим контуром збудження

Напряга статора  $U_r = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ В}$



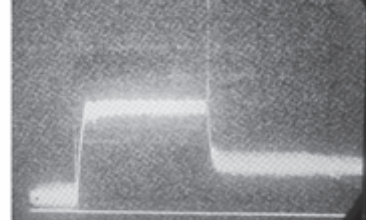
$\Delta U_r = 11\%$ ;  $t_{stab} = 0,36 \text{ с}$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36 \text{ А}$ ;  $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70 \text{ А}$

Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13 \text{ А}$ ;  $I_{f_{фор}} = 117 \text{ А}$

Рисунок 9 – Режим підключення АД з послідовно компенсованим контуром збудження

**Висновки.** Розроблена система з компенсованим контуром збудження забезпечує стійкість роботи АГУ та стабілізацію вихідної напруги СГ при підключенні споживачів співставної потужності та нормальне живлення попередньо підключених споживачів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электро-снабжения / А.В.Праховник. – Київ: Освіта України, 2007. – 462с.
2. Хоменко В.І. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження / В.І.Хоменко, В.Б.Нізімов, С.В.Количев. – Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2015. – 1/8(73). – С.31-36. – ISSN 1729-3774.
3. Хоменко В.І. Техніко-енергетичні показники автономної системи електроживлення на базі синхронного генератора / В.І.Хоменко, В.Б.Нізімов. – Zbiór artykułów

naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej "Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016" (30.12.2016). – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. – С.66-70. – ISBN 978-83-65608-33-8.

*Надійшла до редколегії 25.04.2017.*