

Даний фактор можна пояснити наявністю опорів різного типу електричного обладнання, що вмикається.

#### Висновки.

1. Проведені дослідження показали, що для системи електроживлення промислового підприємства із значною кількістю регульованих перетворювачів при визначенні показників якості електроенергії необхідно враховувати вищі гармоніки до 40 порядку.

2. Показано, що однією з основних причин появи вищих гармонік у мережах підприємства є порушення циклічності вмикання тиристорів у фазах.

3. Структура коефіцієнта несинусоїдальності струму визначається непарними гармоніками низького порядку  $n \leq 7$ , структура коефіцієнта насинусоїдальності напруги змішана та основний вклад роблять гармоніки високого порядку від 21 до 40.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. К.: Техніка, 1974. 184с.
2. Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережах 10 кВ металургійного комбінату. *Збірник наукових праць ДДТУ. Кам'янське*, 2017. Вып. 1 (30). С.104-111.
3. Садовой А.В., Хмельницкий Е.Д., Ключев О.В., Волошин Ю.А. Высшие гармоники в распределительной сети 10 кВ металлургического комбината и вопросы оптимизации работы силовых резонансных фильтров. *Вісник КДПУ ім. Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вып. 2 (49) Ч.1.
4. Хмельницький Е. Д., Ключев О.В. Исследование нестационарных случайных процессов в электроснабжении. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ*. Кременчук: КДПУ, 2005. Вып.3(32). С.144-147.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятности. М.: Наука, 1969. 576с.

Надійшла до редколегії 02.07.2019.

УДК 621.313.322

DOI 10.31319/2519-2884.35.2019.48

НІЗІМОВ В. Б., д.т.н., професор

ХОМЕНКО В. І., \* к.т.н, викладач вищої категорії

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

\*Придніпровський державний металургійний коледж, м. Кам'янське

### ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РЕЖИМІВ ФОРСУВАННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

**Вступ.** Одним з важких режимів роботи синхронних генераторів (СГ) автономних генеруючих установок (АГУ) є підключення споживачів співмірної потужності, у результаті чого генератори втрачають стійкість через інерційність обмотки збудження (ОЗ), значного динамічного падіння напруги та її тривалості. Це призводить до вимикання споживачів навіть при наявності відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження. Крім того АГУ часто використовується в якості резервного джерела електроживлення для споживачів I та II категорії [1].

Наприклад, на виробничій базі птахофабрики «Оріль-Лідер» у цеху забою та переробки курчат-бройлерів вихід готової продукції становить 9500 голів за одну годину,



Рисунок 1 – Принципова схема системи збудження СГ АГУ

Для оцінки впливу ємнісних накопичувачів енергії на швидкодію режимів форсування та на вихідні параметри СГ АГУ виконуємо порівняльні розрахунки.

Рівняння рівноваги напруг для некомпенсованого контуру збудження СГ в сталому режимі.

$$U_R = U_{f0}, \quad (1)$$

де  $U_R$  – падіння напруги на ОЗ,  
 $U_{f0}$  – напруга збудження ТП.

Рівняння рівноваги напруг для некомпенсованого контуру збудження СГ в режимі форсування при наявності початкового струму збудження.

$$U_L + U_R = U_{f\phi} + U_{f0}, \quad (2)$$

де  $U_L$  – напруга на індуктивності контуру збудження,  
 $U_{f\phi}$  – додаткова напруга форсування контуру збудження.

Виразимо напруги через струми:

$$L_f \frac{si_{f\phi}}{dt} + R_f i_{f\phi} = U_{f\phi} + U_{f0},$$

звідки

$$\frac{L_f}{R_f} si_{f\phi} + i_{f\phi} = \frac{U_{f\phi}}{R_f} + \frac{U_{f0}}{R_f},$$

або

$$i_{f\phi} \left( \frac{L_f}{R_f} s + 1 \right) = \frac{U_{f\phi}}{R_f} + \frac{U_{f0}}{R_f},$$

і остаточно за умови  $\frac{U_{f0}}{R_f} = const$

$$i_{f\phi} = \left( \frac{1}{T_f s + 1} \right) \frac{U_{f\phi}}{R_f} + \frac{U_{f0}}{R_f}, \quad (3)$$

де  $T_f = \frac{L_f}{R_f}$  – стала часу збудження,

$R_f$  – активний опір ОЗ.

Представимо вираз струму збудження у вигляді структурної схеми (рис.2).

При вмиканні в контур збудження конденсатора ЄНЕ та його розряді рівняння напруг має вигляд [3]:

$$U_R + U_L + U_C = U_{f0} \quad (4)$$

Виразимо всі величини через струм форсування:

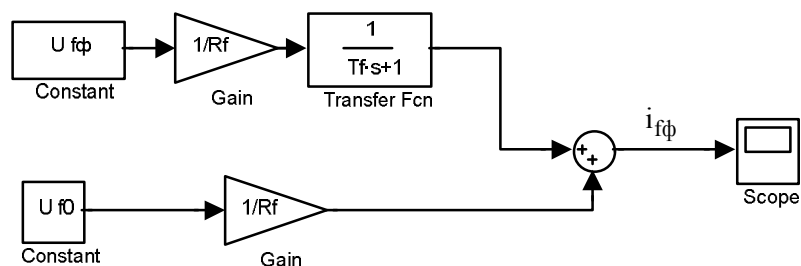


Рисунок 2 – Структурна схема некомпенсованого контуру збудження СГ

$$R_f i_{f\phi} + L_f s i_{f\phi} + \frac{1}{cs} i_{f\phi} = U_{f0} \quad (5)$$

Розв'язавши диференціальне рівняння (5) при початкових умовах  $i_f = \frac{U_f}{R_f}$ ,

$U_c = U_{c0}$ , отримаємо залежність струму від величини напруги ємнісного накопичувача енергії

$$i_{f\phi} = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{cs}{T_f cs^2 + R_f cs + 1} + i_{f0}, \quad (6)$$

де  $\beta = \frac{R_f}{2L_f}$  – коефіцієнт затухання контуру збудження.

Представимо вираз струму збудження у вигляді структурної схеми (рис.3).

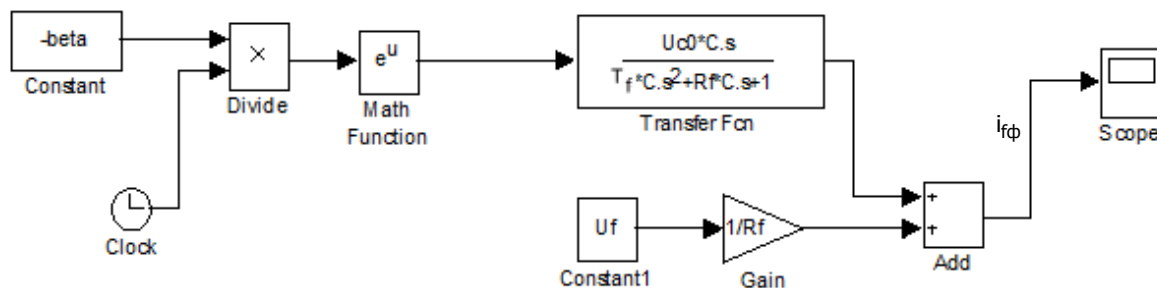


Рисунок 3 – Структурна схема компенсованого контуру збудження СГ при наявності струму збудження

Аналіз режимів форсування струму збудження СГ дає підстави для визначення алгоритму керування контуром збудження [3, 4]:

при  $t > 0$  і  $p i_f = 0$  необхідно вивести конденсатор із контуру збудження, при цьому  $U_f = U_{f\phi}$  і  $X_L = X_C$ .

У випадку повної компенсації інерційності, струм контуру збудження буде практично безінерційно слідувати за напругою форсування.

Вказаний алгоритм керування контуром збудження СГ реалізований в математичній моделі, приведеній на рис. 4.

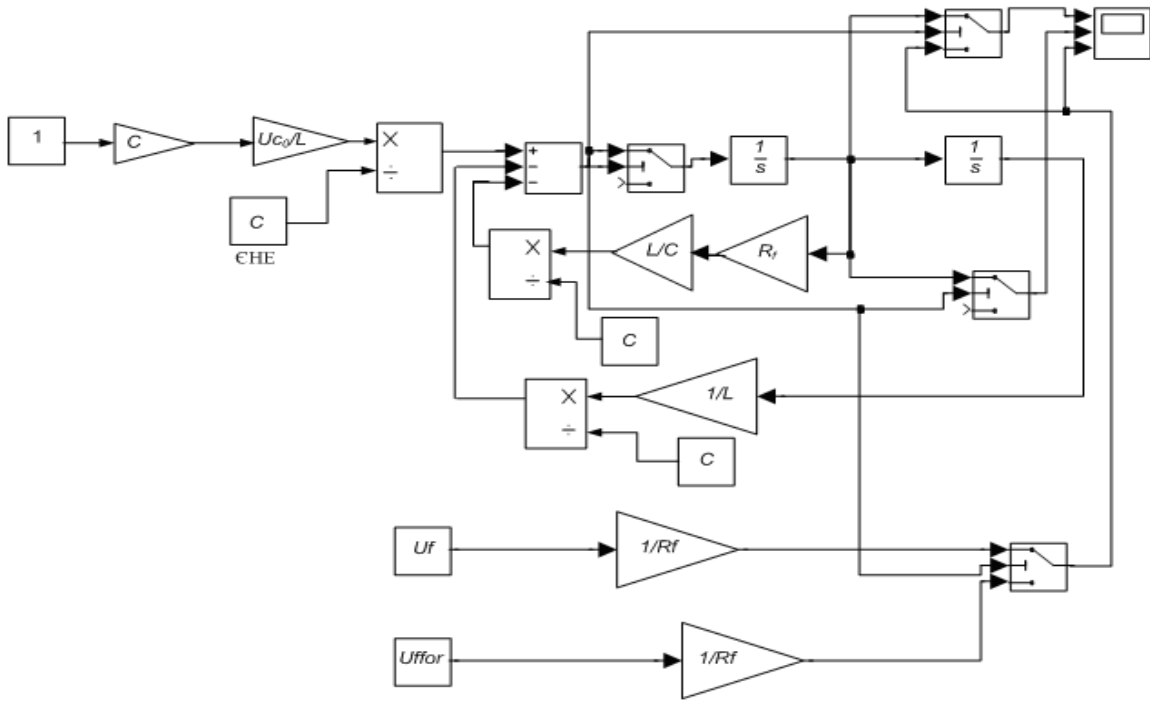


Рисунок 4 – Структурна схема алгоритму керування контуром збудження СГ

Результати математичного моделювання режимів форсування струму збудження СГ при кратності форсування напруги: 1)  $K_i = 2,5$ ; 2)  $K_i = 2,0$ ; 3)  $K_i = 1,5$  наведені на рис. 5. На рис. 5,а наведені розрахункові залежності режиму форсування, що характерні для серійних тиристорних збуджувачів з некомпенсованим контуром. На рис. 5,б наведено розрахункові залежності режимів збудження при наявності ємності та початкового струму збудження, які виконані по структурній схемі наведеній на рис. 4.

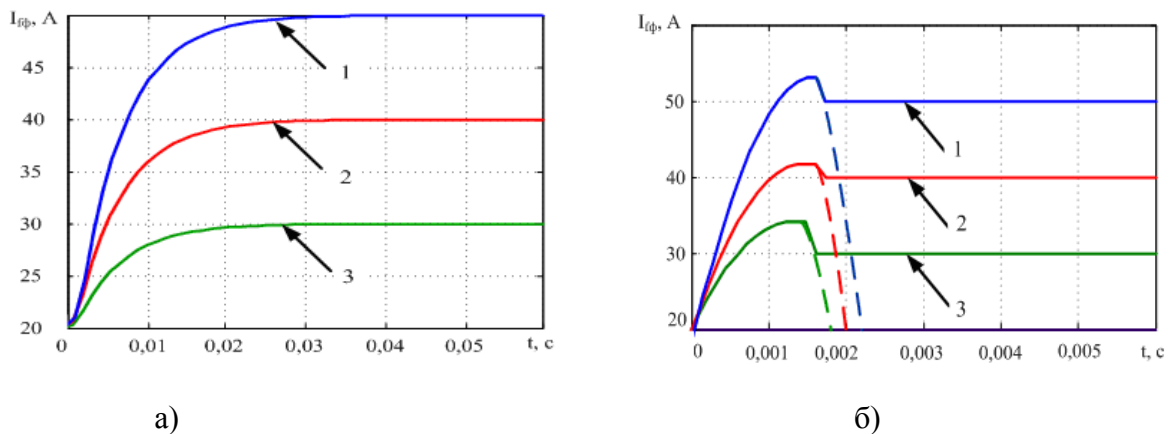


Рисунок 5 – Розрахункові залежності режимів форсування напруги збудження СГ: а) некомпенсованого контуру; б) компенсованого контуру

Аналіз отриманих залежностей показує, що при некомпенсованому контурі з кратністю форсування  $K_i = 2,5$  максимальне значення струму збудження 50,0 А досягається за час 0,04 с, а при компенсованому значення струму 52,2 А досягається лише за час 0,0015 с.

На рис. 6, 7 наведені розрахункові залежності вихідної напруги СГ  $U_F = 230$  В з початковим збудженням  $U_f = 22$  В при вмиканні співставного навантаження, відсутності та наявності ємності накопичувача енергії.

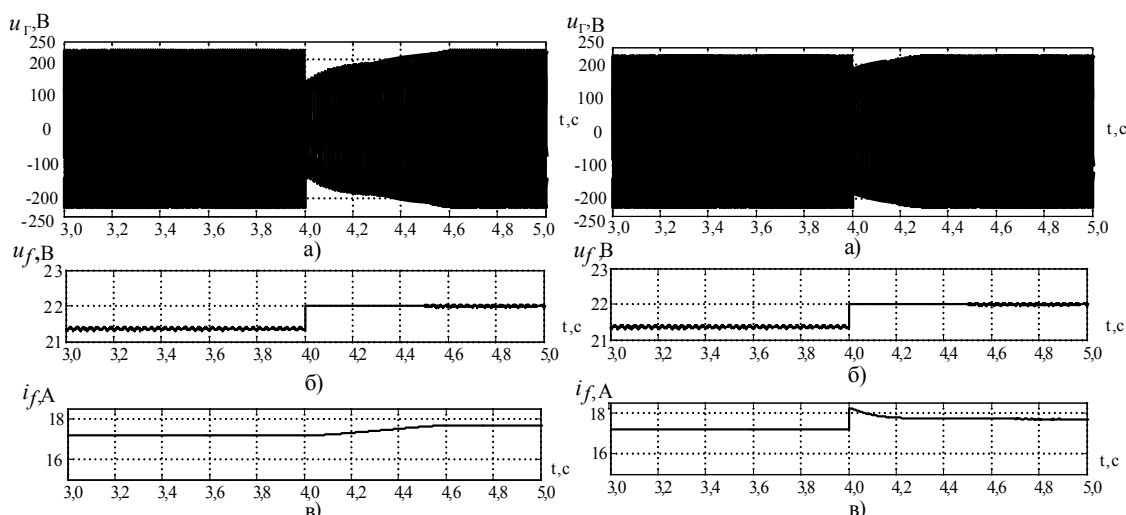


Рисунок 6 – Розрахункові залежності режиму форсування струму збудження СГ без ЄНЕ

Рисунок 7 – Розрахункові залежності режиму форсування струму збудження СГ з ЄНЕ

Аналіз перехідних процесів показує, що час стабілізації вихідної напруги СМ без ЄНЕ складає  $t \approx 0,6$  с, а з ЄНЕ  $t \approx 0,2$  с. Таким чином при одній і тій самій кратності максимальної напруги збудження швидкодія пристрою, що досліджується, в режимі форсування в три рази вища, ніж без ЄНЕ, а падіння напруги відповідно складає  $\Delta U = 40 \%$  та  $\Delta U = 10 \%$ .

Для підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження на синхронному генераторі типу МСА-72/4А:  $P_n = 12$  кВт;  $U_c = 230$  В;  $i_{1n} = 37,6$  А;  $U_{fn} = 27$  В;  $i_{fn} = 23$  А;  $n_n = 1500$  об/хв. в режимі форсування струму збудження з запропонованим пристроєм і з серійними тиристорними збуджувачами при підключенні споживачів співставної потужності (рис.7, 8).

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

Таким чином, результати дослідження динамічних режимів роботи СГ типу МСА-72/4А доводять, що час досягнення струмом збудження форсованого значення з некомпенсованим контуром становить 1 с. при падінні напруги 39 %, а з емнісним накопичувачем енергії – 0,01 с. Компенсація електромагнітної інерційності в тих же умовах забезпечує падіння напруги не більше 11 %.

**Висновки.** Підвищення динамічної стійкості синхронного генератора АГУ при підключенні споживачів співставної потужності може бути забезпечено емнісною компенсацією інерційності контуру збудження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Праховник А. В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электро-снабжения / А. В. Праховник. – Київ : Освіта України, 2007. – 462 с.
2. Птахофабрика «ОПІЛЬ-ЛІДЕР». URL : <https://www.mhp.com.ua/uk/operations/chaorelj-lider> (дата звернення: 02.03.2018)
3. Хоменко В.І. Енергообмінні процеси між контурами автономного синхронного генератора / В.І.Хоменко, В.Б.Нізімов // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2017. Вип. 1 (30). С. 111–116.

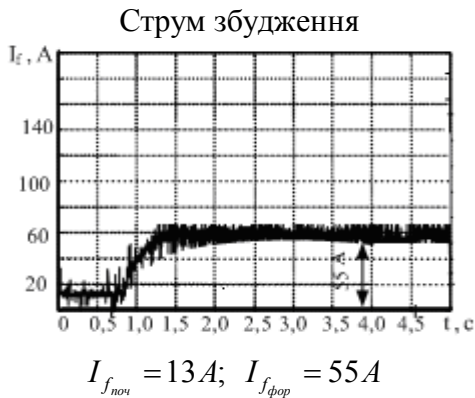
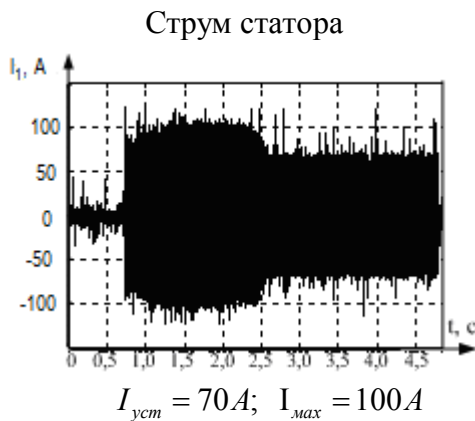
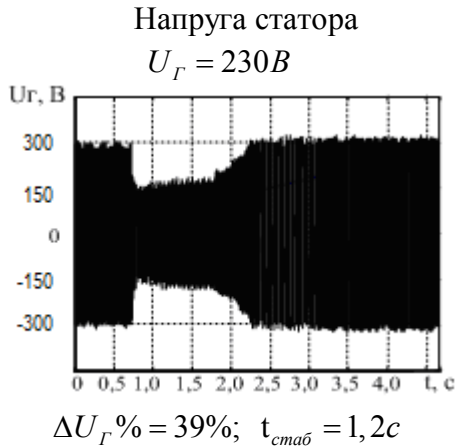


Рисунок 8 – Режим підключення АД до СГ з некомпенсованим контуром збудження

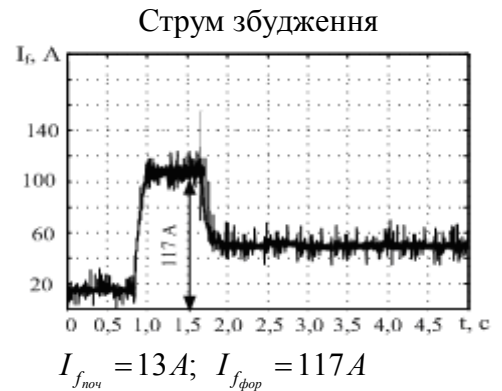
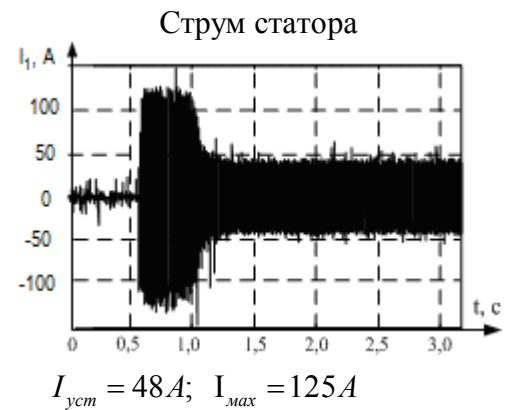
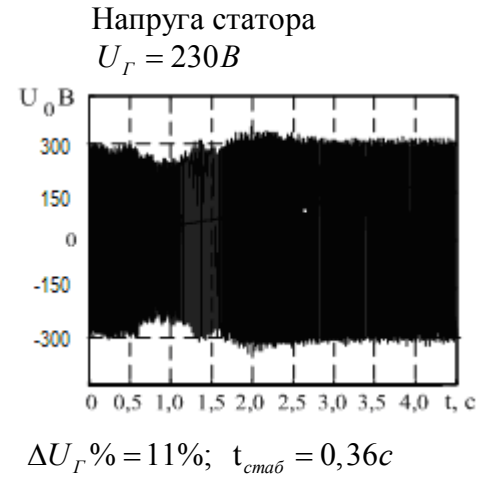


Рисунок 9 – Режим підключення АД до СГ з компенсованим контуром збудження

- Нізімов В. Б. Підвищення стійкості автономної генеруючої установки при значних збуреннях/ Нізімов В. Б., Количев С. В., Хоменко В. І. // Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція. Збірник матеріалів конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'17», 25-27 квітня, 2017 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. – С. 49–50.

Надійшла до редколегії 02.07.2019.