

Технічні науки

УДК 621.313.322

**Нізімов Віктор Борисович**

*доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки  
Дніпровський державний технічний університет*

**Низимов Виктор Борисович**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электротехники и электромеханики  
Днепровский государственный технический университет*

**Nizimov Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of Electrotechnics and Electromechanics Department  
Dniprovsk State Technical University*

**Філін Ігор Вячеславович**

*асистент кафедри електротехніки та електромеханіки  
Дніпровський державний технічний університет*

**Филин Игорь Вячеславович**

*ассистент кафедры электротехники и электромеханики  
Днепровский государственный технический университет*

**Filin Igor**

*Assistant of Electrotechnics and Electromechanics Department  
Dniprovsk State Technical University*

**КОМПЕНСАЦІЯ ІНЕРЦІЙНОСТІ КОНТУРУ ЗБУДЖЕННЯ  
АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ФОРСУВАННІ  
НАПРУГИ**

**КОМПЕНСАЦИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ КОНТУРА ВОЗБУЖДЕНИЯ  
АВТОНОМНОЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ПРИ  
ФОРСИРОВКЕ НАПРЯЖЕНИЯ  
COMPENSATION OF THE INFERTILITY OF THE EXCITATION  
CIRCUIT OF A STAND-ALONE GENERATING UNIT WITH  
VOLTAGE FORCING**

***Анотація.** Розглянуто способи та пристрої компенсації інерційності контуру збудження синхронного генератора в режимі форсування. Теоретично та експериментально доведено, що ємнісна компенсація інерційності контура збудження з одночасним вимиканням форсуючої напруги в 10 разів вище порівняно з існуючими системами керування.*

***Ключові слова:** режими форсування, компенсація, синхронний генератор.*

***Аннотация.** Рассмотрены способы и устройства компенсации инерционности контура возбуждения синхронного генератора в режиме форсировки. Теоретически и экспериментально доказано, что емкостная компенсация инерционности контура возбуждения с одновременным выключением форсирующего напряжения в 10 раз выше в сравнении с существующими системами управления.*

***Ключевые слова:** режимы форсировки, компенсация, синхронный генератор.*

***Summary.** Methods and devices for compensation of the inertia of the excitation circuit of a synchronous generator in the boost mode are considered. It has been theoretically and experimentally proved that the capacitive compensation of the inertia of the excitation circuit with the simultaneous*

*switching off of the forcing voltage is 10 times higher in comparison with existing control systems.*

**Key words:** *forcing modes, compensation, synchronous generator.*

**Вступ.** Основним режимом роботи синхронних генераторів автономних генеруючих установок є режим, близький до номінального.

При роботі СГ збурюючим фактором є підключення споживачів різної потужності, а у ряді випадків – співставної потужності. Наприклад, при підключенні АД з к.з. ротором СГ втрачають стійкість через інерційність контуру збудження, значного динамічного падіння напруги статора та її тривалості, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів і порушення складного технологічного процесу.

Для підвищення стійкості СГ та стабілізації вихідної напруги статора застосовують автоматичне регулювання збудження (АРЗ), яке не завжди забезпечує виконання цих функцій.

Проте застосування відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження не забезпечує зниження інерційності самого контура збудження (КЗ), тобто струм в обмотці збудження (ОЗ) завжди має аперіодичне запізнювання по відношенню до форсувальної напруги, що у результаті визначає стійкість СГ.

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контуру збудження синхронного генератора шляхом підвищення кратності формуючої напруги збудження, зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур.

**Постановка задачі.** Теоретичне та експериментальне дослідження способів та пристроїв компенсації інерційності контуру збудження автономного СГ при значних збуреннях для зменшення негативних наслідків.

**Результати роботи.** Розглянемо наступні можливі способи компенсації інерційності контуру збудження СГ. Вмикання в КЗ узгодженої компенсуючої напруги при незмінній сталій часу. Вмикання в контур збудження активного опору або електричної ємності з одночасною компенсуючою напругою.

Для порівняльної оцінки відомих способів компенсації інерційності контуру збудження СГ виконуємо відповідні розрахунки за наступними виразами, які реалізовані у пакеті Matlab/Simulink [1, стор.47-51].

Залежність струму збудження від коефіцієнта форсування визначається виразом.

$$i_{f\phi} = \left( \frac{1}{T_f s + 1} \right) \frac{K_\phi U_0}{R_f} + \frac{U_{f0}}{R_f}, \quad (1)$$

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

Залежність струму збудження від коефіцієнта форсування та активного опору визначається виразом.

$$i_{f\phi} = \left( \frac{1}{T_{fd} s + 1} \right) \frac{K_\phi U_0}{R_f} + \frac{U_0}{R_f}, \quad (2)$$

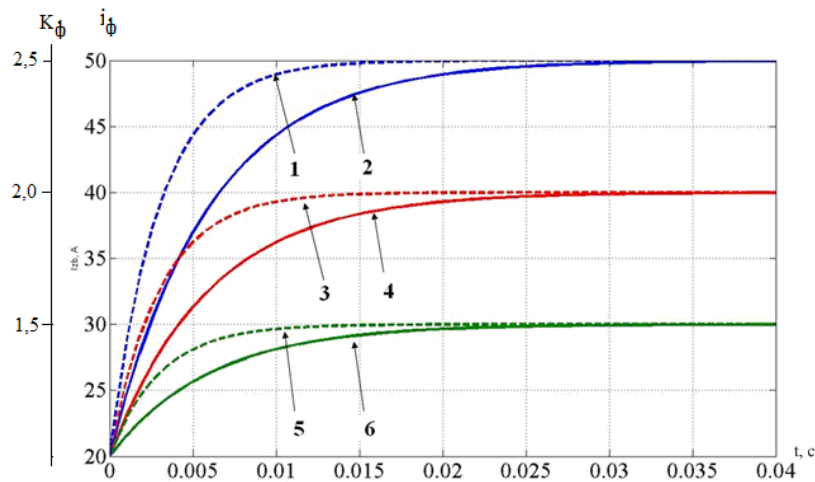
де  $T_{fd} = \frac{T_f}{1 + K_R}$  – стала часу при компенсації вмиканням  $R_\phi$ .

Залежність струму збудження від коефіцієнта форсування напруги та величини ємності визначається виразом.

$$i_{f\phi} = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{cs}{T_f cs^2 + R_f cs + 1} + \frac{U_{f0}}{R_f}. \quad (3)$$

Результати математичного моделювання режимів форсування струму збудження СГ виконані при кратності форсування напруги: 1)  $K_\phi = 2,5$ ; 2)  $K_\phi = 2,0$ ; 3)  $K_\phi = 1,5$ .

На рис. 1 наведені розрахункові залежності режиму форсування з некомпенсованим та компенсованим контурами.

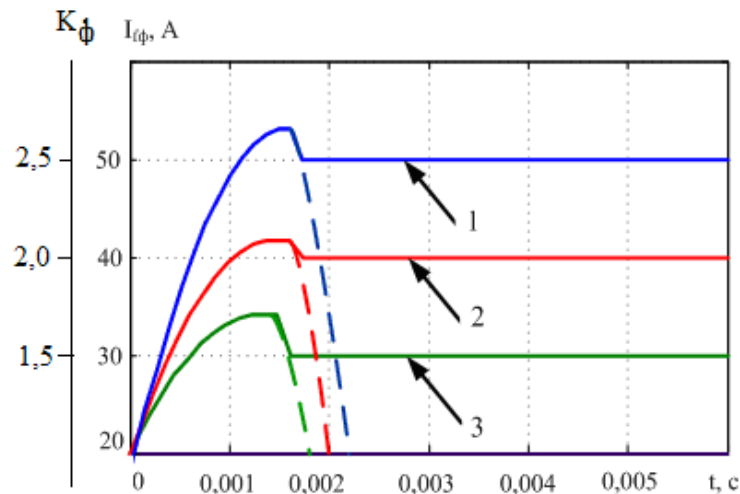


**Рис. 1. Розрахункові залежності режимів форсування напруги:**

1, 3, 5 – компенсація вмиканням  $R_d$  (пунктирна лінія); 2, 4, 6 – некомпенсований контур (суцільна лінія)

На рис. 2 наведені розрахункові залежності режимів збудження при розряді ємності з одночасним вмиканням компенсуючої напруги за тими ж коефіцієнтами.

Аналіз отриманих залежностей показує, що при некомпенсованому контурі з кратністю форсування  $K_i = 2,5$  усталене значення струму збудження досягається за час 0,02 с, а при ємнісній компенсації усталене значення струму досягається лише за час 0,002 с. Таким чином, швидкодії зростання струму збудження у 10 разів більше при ємнісній компенсації. Крім того, компенсація інерційності контуру збудження вмиканням активного опору потребує збільшення коефіцієнта форсування у 2 рази, що не завжди можливо.



**Рис. 2.** Розрахункові залежності при вмиканні електричної ємності

Однак, отримані залежності (рис. 1 та 2) не враховують впливу інших контурів статора.

Для врахування впливу контурів СГ виконано розрахунки режимів форсування напруги збудження по повній системі диференціальних рівнянь у в.о. системи  $x_{ad}$ .

На рис. 3 представлено математичну модель та структурну схему системи збудження синхронного генератора в складі АГУ із застосуванням електричної ємності в КЗ, яка компенсує інерційність останнього.

Розроблена модель передбачає керування контуром збудження не тільки у функції напруги та струму статора, а також функції похідної електромагнітного моменту генератора за кутом навантаження [2, с. 31-36].

За математичною моделлю рис. 3. проведені теоретичні дослідження СГ з ємнісною компенсацією контуру та без останнього.

Розрахункові залежності режимів форсування збудження модельного СГ представлені на рис. 4.

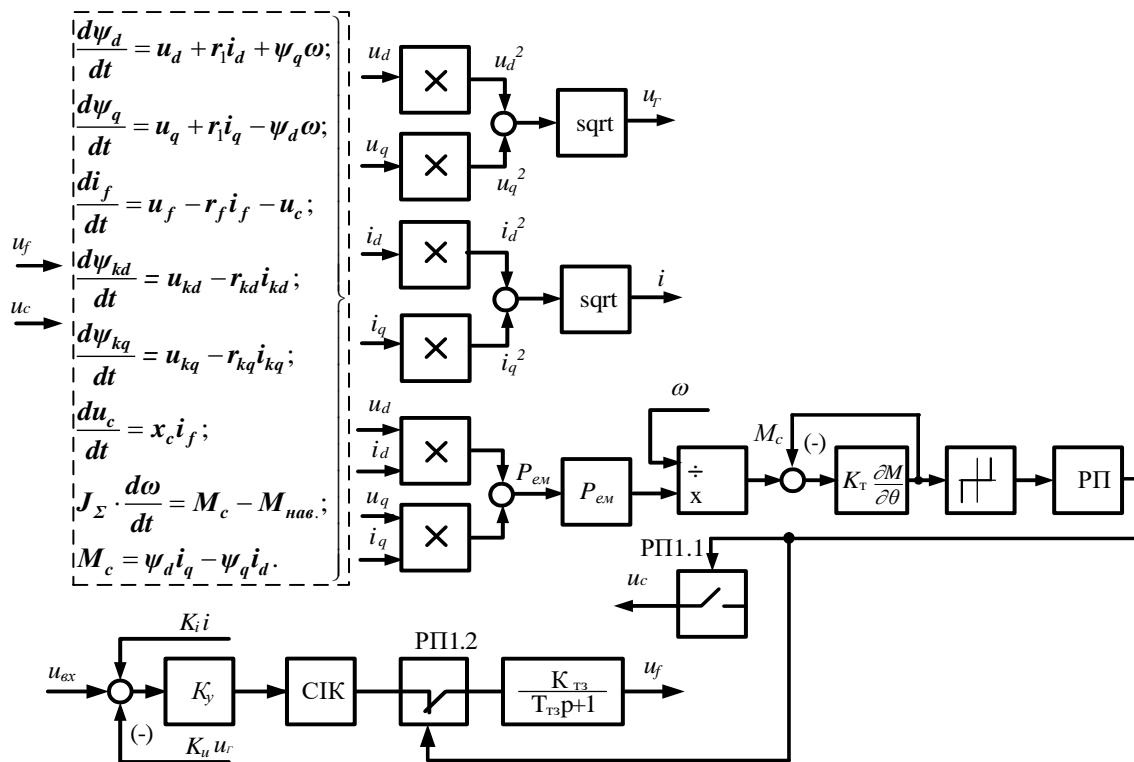


Рис. 3. Математична модель СГ та структурна схема системи керування КЗ СГ

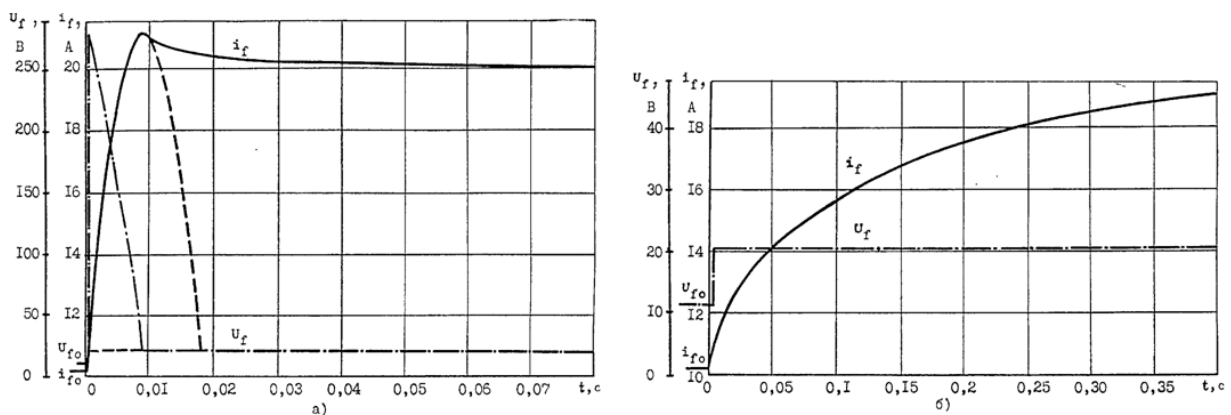
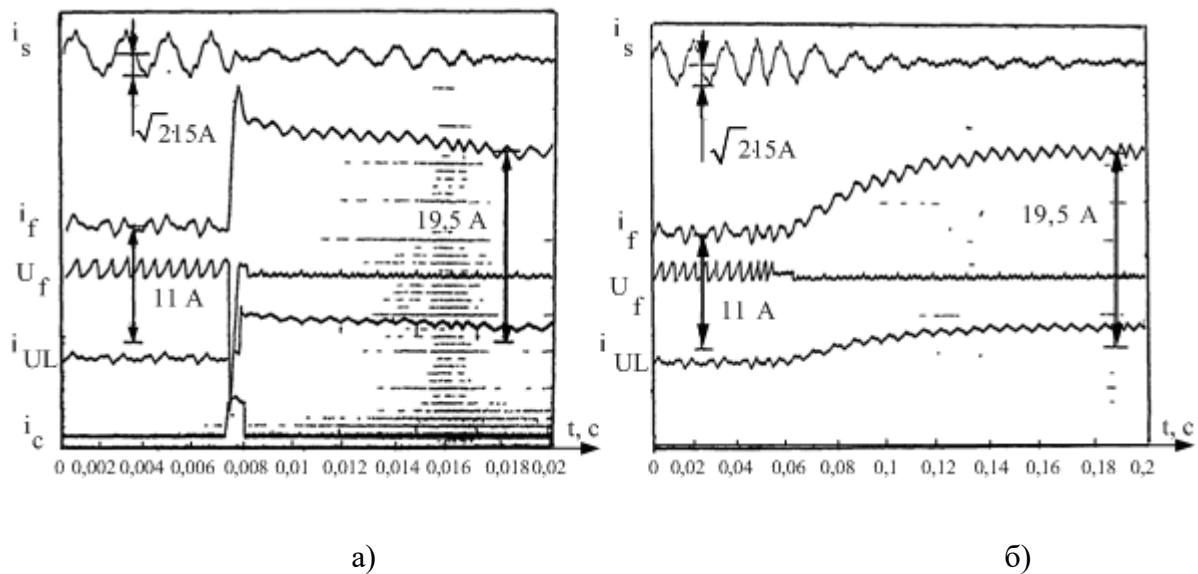


Рис. 4. Розрахункові залежності режимів форсування збудження модельного СД:  
а) з ємністю, б) без ємності

Аналіз отриманих залежностей показує, що взаємодія режимів форсування у 10 разів вища у порівнянні з існуючими системами.

Для підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження на синхронному генераторі типу МСА-72/4А:  $P_H=12$  кВт;  $n_H=1500$  об/хв. в режимі форсування струму збудження з запропонованим пристроєм і з серійними тиристорними

збуджувачами при підключенні споживачів співставної потужності (рис. 5, а, б).

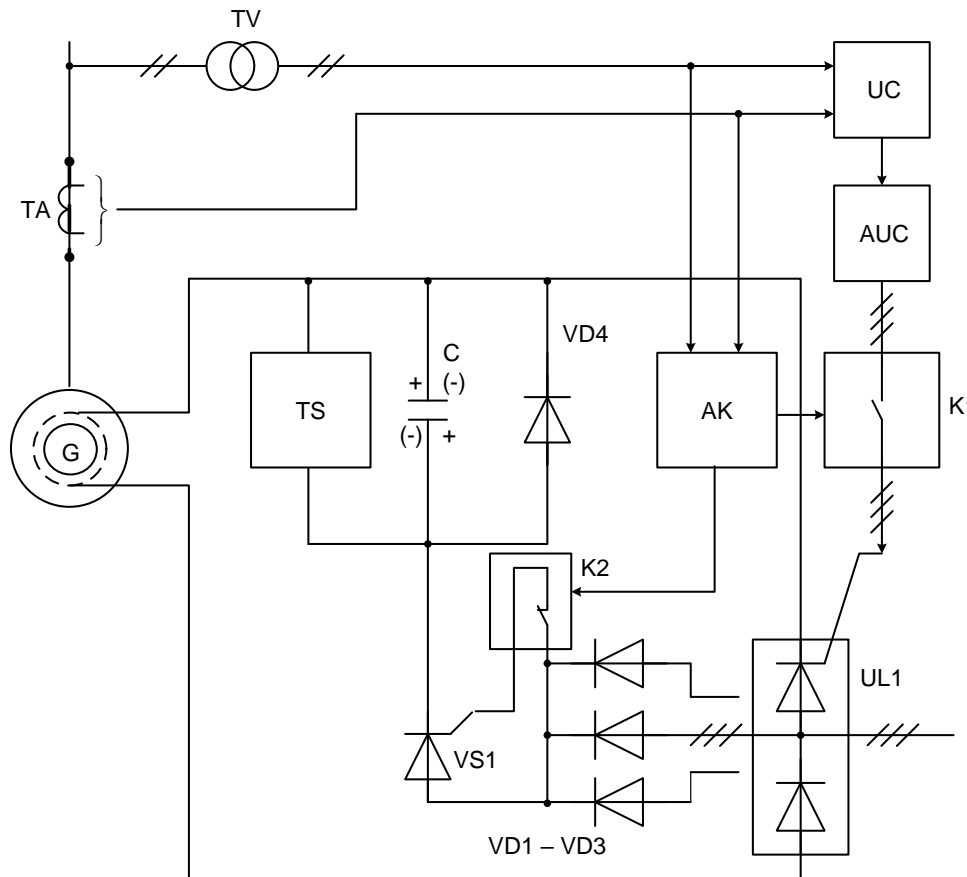


**Рис. 6. Осцилограми режимів форсування струму збудження в запропонованому (а) і в існуючому збуджувачах (б)**

Аналіз осцилограм (рис. 6, а і б) показує, що час досягнення струмом збудження форсировочного значення складає відповідно до 0,008 і 0,16 с. Таким чином, при одній і тій же кратності найбільшої напруги збуджувача швидкодія даного пристрою в режимі форсування збудження приблизно в 20 разів вища, ніж традиційних систем збудження.

Один з можливих варіантів пристроїв збудження СГ, який забезпечує режим форсування струму, наведено на рис. 7 [3]. При номінальному навантаженні СГ струм в контурі збудження визначається початковою уставкою збуджувача UL і блоком AP3 UC. Конденсатор HE заряджений від джерела зарядної напруги TS напругою необхідної полярності.





**Рис. 7. Принципова схема пристрою для керування СГ з ємністю у контурі збудження**

У момент ударного прикладання навантаження при значному зниженні напруги на статорі СГ за сигналами датчиків струму ТА і напруги TV спрацьовують порогові елементи, що входять у блок керування форсуванням АК, який ключами К1 знімає керуючі імпульси з катодної групи тиристорів збуджувача, а ключем К2 включає комутуючий тиристор VS1. При включенні тиристора VS1 зустрічним струмом НЕ вимикається катодна група тиристорів UL, а обмотка збудження переключається на форсуючу напругу збуджувача за наступною схемою: ОЗ СГ — вентиля анодної групи UL — розділові діоди VD1-VD3 — комутуючий тиристор VS1 — конденсатор С — ОЗ СГ. Одночасно відбувається розряд ємності в контурі збудження. Струм в ОЗ зростає до форсувального значення. Паралельно система АК UC виробляє коригувальний сигнал у функції вимірюних струму і напруги СГ і через

систему вертикального керування AUL встановлює необхідний кут керування збуджувачем. При досягненні напруги на перезарядженому конденсаторі С заданого значення, останній розряджається через діод VD4. На катодну групу тиристорів UL подаються керуючі імпульси від AUL при замиканні ключа KI, і в ОЗ встановлюється струм, значення якого визначається пристроєм АК УС.

**Висновки.** Підвищення динамічної стійкості СГ АГУ при підключенні споживачів співставної потужності може бути забезпечено ємнісною компенсацією інерційності КЗ з керуванням напругою форсування у функції похідної електромагнітного моменту СГ за кутом навантаження.

Доведено, що ємнісна компенсація інерційності контуру збудження з одночасним вмиканням формуючої напруги у 10 разів вища у порівнянні з існуючими системами керування.

### **Література**

1. Хоменко В.І. Порівняльна оцінка режимів форсування збудження синхронного генератора автономної генеруючої установки / В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Збірник наукових праць, Київ. 2019. № 1(63). 3 том. 68 с. С. 47-51.
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 «Энергосберегающие технологии и оборудование», Харків, 2015. 1/8(73). С. 31-36. ISSN 1729-3774.
3. Нізімов В.Б., Нізімов Р.В., Сторожко В.С. Спосіб форсування струму збудження синхронного двигуна та пристрій для його реалізації. Патент 60652 (Україна). Заявлено 24.01.2003р. Надруковано 15.10. 2003. Бюл. №10. 10 с.