

УДК 621.313.333: 621.314.54: 621.316.765

**К. М. Василів**, д-р техн. наук

### УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА СТАБІЛЬНОЇ ЧАСТОТИ З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ДВІ ЗІРКИ

*Анотація.* Запропоновано математичну модель генератора стабільної частоти з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем, яка дає змогу моделювати динамічні процеси під час роботи генератора в режимі неробочого ходу з врахуванням наявності рушії та функціонування систем автоматичного керування.

**К. Н. Васильев**, д-р техн. наук

### ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ С БЕСКОНТАКТНЫМ КАСКАДНЫМ ТРЕХФАЗНО-ТРЕХФАЗНЫМ МОДУЛИРОВАННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ ПО СХЕМЕ В ДВЕ ЗВЕЗДЫ

*Аннотация.* Предложена математическая модель генератора стабильной частоты с бесконтактным каскадным модулированным возбудителем, позволяющая моделировать динамические процессы при работе генератора в режиме холостого хода с учетом наличия движителя и функционирования системы автоматического управления.

**К. М. Vasylyv**, ScD

### GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE GENERATOR STABLE FREQUENCY CONTACTLESS CASCADE THREE-PHASE THREE-PHASE-MODULATED EXCITER CIRCUIT FOR A TWO-STAR

*Abstract.* A mathematical model of stable frequency generator with static cascade modulated agent can simulate the dynamic processes at the generator is running at idle with the availability of propulsion and operation of automated governance.

**Постановка проблеми.** В класичному варіанті генераторів на базі електричних машин змінного струму частота напруги залежить від швидкості обертання ротора, що істотно звужує область застосування генераторів змінного струму. Наприклад, у автономних системах електроживлення ця обставина створює складну проблему – нестабільність частоти напруги.

На сьогодні один із перспективних варіантів створення генераторів стабільної частоти (ГСЧ) вбачається в формуванні системи генерування на базі безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БКМЗ) [4]. Такі системи генерування придатні для практичного застосування, але, враховуючи складність їх будови та процесів, які відбуваються в цих системах, вони ще достатньо не вивчені. Ефективно вирішити цю проблему можна за допомогою математичних моделей високого рівня адекватності. Тому розробка таких математичних моделей як засобів дослідження подібних систем генерування є актуальною науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробці математичних моделей ГСЧ для досить довгого переліку схемних рішень модулятора і збуджувача надавалася значна увага. Так, у [2] розроблено математичну модель ГСЧ з БКМЗ за двонульовою схемою циклоконвертора. Ця математична модель давала змогу моделювати електромагнітні процеси ГСЧ для заданого фіксованого значень ковзання, що істотно обмежувало її функціональні можливості. До принципово вищого рівня адекватності математичних моделей цієї ж системи належить модель [1], яка на відміну від її аналога [2] дає змогу моделювати динамічні

електромагнітні і електромеханічні процеси, тобто для змінної швидкості обертання ротора генератора.

**Викладення матеріалу.** Отже, виходячи з наведеного вище, предметом статті є розроблення математичної моделі ГСЧ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою циклоконвертора в дві зірки, яка б давала змогу моделювати динамічні перехідні і усталені

© Василів К. М., 2011  
електромагнітні і електромеханічні процеси з врахуванням функціонування рушії ротора генератора. Схема силового електричного кола такої системи живлення зображена на рис. 1. Її структурними елементами слугують: трифазно-трифазний модулятор, який складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розділені на три гілки та з'єднані в один спільний вузол; джерела живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, дві обмотки ротора якої з'єднані в дві окремі зірки. Всі решта позначення на схемі рис.1 є загально прийнятими, тому зайво їх описувати. Тут лише зазначимо, що літерами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин.

Теоретичною основою математичної моделі ГСЧ слугує теорія математичного моделювання електромашино-вентильних системи [5], а також методи, розроблені в [3]. Математичною моделлю ГСЧ слугує система диференціальних рівнянь електричної рівноваги, яка описує схему силового електричного кола [1,3], система диференціальних рівнянь механічної рівноваги, яка описує динаміку зміни швидкості обертання вала ротора генератора, логічні рівняння, які описують функціонування системи керування БТПЧ

© Василів К. М., 2011

та рівняння, які моделюють зміну частоти напруги заповнення та кута вентилів БТПЧ, а також система диференціальних рівнянь, які описують роботу систем автоматичного керування (САК) напруги або струму генератора та САК швидкості обертання ротора генератора.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги структурних елементів схеми силового електричного кола підослідної системи записані на підставі законів Кірхгофа та згідно з методом вузлових потенціалів [3, 5].

Рівняння для електричних машин записані з врахуванням всіх наявних електромагнітних зв'язків між фазними контурами обмоток для кожної з машин.

Повна система рівнянь електричної рівноваги ГСЧ в базисі електричних потенціалів незалежних вузлів для схеми силового електричного кола рис.1 у матричній формі

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (1)$$

де  $A$  – матриця коефіцієнтів,  $B$  – вектор вільних членів,  $\varphi = (\varphi_1 \div \varphi_{20})$  – вектор електричних потенціалів незалежних вузлів схеми силового електричного кола (вектор невідомих).

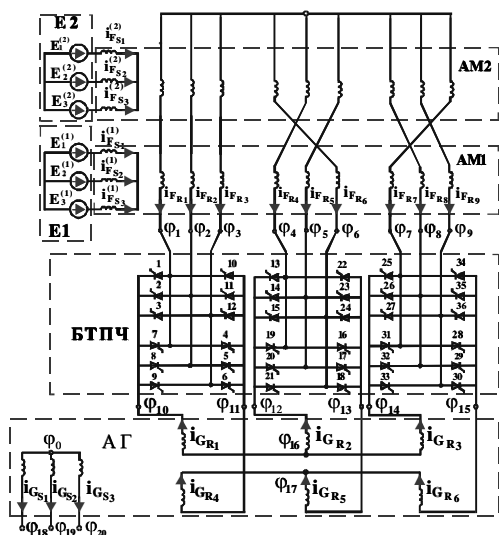


Рис.1. Схема силового електричного кола ГСЧ

Рух ротора генератора представимо джерелом механічного моменту, крутильний механічний момент якого прикладається до вала ротора генератора. Тому механічну рівновагу ротора генератора опишемо диференціальним рівнянням

$$J \cdot p\omega_G + M_H + M_F + M_G - M_R = 0, \quad (2)$$

де  $J$  – приведений сумарний момент інерції обертючих мас;  $p\omega_G = d\omega_G/dt$  – похідна за часом  $t$  кутової швидкості обертання вала ротора генератора (невідоме);  $M_H$  – статичний момент навантаження;  $M_F$  – сумарний електромагнітний момент машин модулятора;  $M_G$  – електромагнітний момент генератора;  $M_R$  – крутильний механічний момент рушія вала ротора генератора.

Розглянемо САК швидкості обертання ротора генератора, структурна схема якої зображена на рис. 2, де  $\omega_{G3}$ ,  $\omega_G$  – задана та реальна швидкості ротора ге-

нератора відповідно;  $\Delta\omega_G = \omega_{G3} - \omega_G$  – відхилення швидкості ротора ГСЧ від заданого її значення.

Система автоматичного стабілізування швидкості обертання ротора генератора реалізована пропорційно-інтегральним регулятором. Згідно з цим, а також з рис.2 поточне значення механічного крутного моменту визначається

$$M_R = K_p^0(\omega_{G3} - \omega_G) + K_i^0 \int (\omega_{G3} - \omega_G) dt + M_0, \quad (3)$$

де  $K_p^0$ ,  $K_i^0$  – коефіцієнти пропорційного та інтегра-

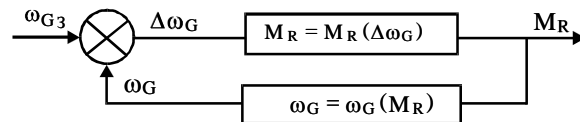


Рис.2. Структурна схема САК стабілізування швидкості ротора генератора

льного регуляторів швидкості обертання ротора АСГ;  $M_R$  – початкове значення крутного моменту.

До основних вхідних даних для розрахунку процесів належать такі величини: каталожні параметри електричних машин та початкові умови, що входять до вектора інтегрованих змінних  $V$ , який водночас є і результатом розрахунків та має таку структуру:

$$V = (i_{FS}^{(1)}, i_{FS}^{(2)}, i_{FR}^{(1)}, \gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \omega_F, i_T, i_{GS}, i_{GR}, \gamma_G, \omega_G, i_{DS}^{(1)}, i_{DR}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, i_{DS}^{(2)}, i_{DR}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}, i_{DS}^{(3)}, i_{DR}^{(3)}, \gamma_D^{(3)}, \omega_D^{(3)}, i_M, i_H, i_C, u_C^c, \int (\omega_{G3} - \omega_G) dt, \int (i_{GS}^v - i_3) dt, \int (u_{GS}^v - u_3) dt, f_z, \gamma_z, t), \quad (4)$$

Для ілюстрації адекватності математичної моделі та дієздатності програмного комплексу наводимо результати розрахунку електромагнітних процесів, які відбуваються в ГСЧ потужністю 100 кВт. Результати розрахунку основних координат ГСЧ у вигляді графіків зображені на рис. 3 ÷ 5.

Моделювання процесів виконаємо для режиму неробочого ходу генератора, який передбачає зміну швидкості обертання рушія за визначеною закономірністю ковзання, та вмикання збудження генератора. Такий підхід дає змогу моделювати рух ротора генератора за довільною апіорі заданою закономірністю.

На рис. 3 зображено розрахункову залежність заданого ковзання генератора –  $S_3$ . З нього видно, що задане значення ковзання генератора змінюється в межах від - 0,04 до + 0,04.

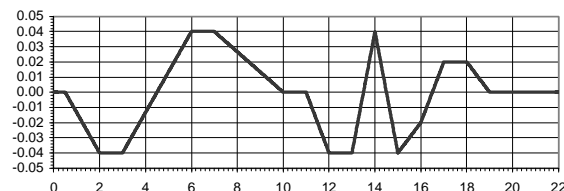


Рис.3. Залежність заданого ковзання генератора  $S_3$

На рис.4 зображена розрахункова залежність  $u_{GS}^v$  – модуля зображувального вектора фазних напруг статора, яка за фізичним змістом є амплітудою фазних напруг статора генератора. З характеру кривої на

цьому рисунку видно, що система автоматичного керування достатньо якісно виконує функцію стабілізації амплітуди напруг статора генератора для заданого діапазону ковзання ротора генератора див. рис. 3.

Принципово важливу інформацію з погляду перебігу електромагнітних процесів і функціонування генератора стабільної частоти загалом несуть розрахункові залежності фазних струмів ротора генератора.

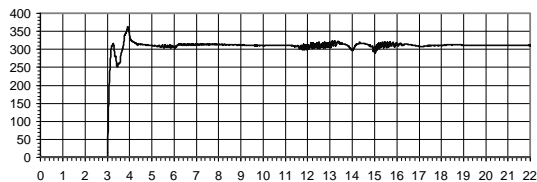


Рис.4. Розрахункова залежність модуля зображувального вектора фазних напруг статора  $u^v_{GS}$

На рис.5 зображено розрахункові залежності півсум струмів однойменних фаз гілок двох обмоток ротора генератора

$$i_{\mu_1} = \frac{i_{GR1} + i_{GR4}}{2}; \quad i_{\mu_2} = \frac{i_{GR2} + i_{GR5}}{2}; \quad i_{\mu_3} = \frac{i_{GR3} + i_{GR6}}{2}.$$

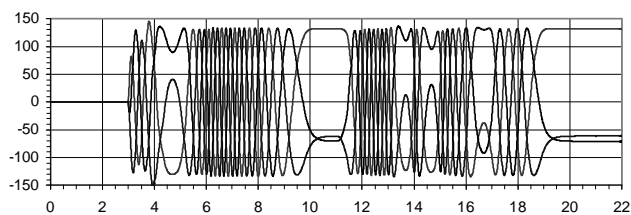


Рис. 5. Півсуми струмів однойменних фаз обмоток ротора генератора  $i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, i_{\mu_3}$

З нього видно, що частота струмів дорівнює частоті ковзання. Для синхронної швидкості (коли ковзання генератора дорівнює нулю) частота струмів ротора генератора також дорівнює нулю, тобто, спостерігаємо випрямлений струм, а під час коливання швидкості ці струми змінюються з частотою ковзання. Саме ця обставина дає змогу забезпечити постійну частоту обертання магнітного поля стосовно обмоток статора генератора, а отже і стабільну частоту напруги.

Розрахункові залежності основних координат, які зображені на рис. 3-5, дають достатньо повну уяву як про функціонування генератора стабільної частоти загалом (оскільки відображають фізику процесів, які відбуваються в цій системі), так і про рівень адекватності і можливості математичної моделі і відповідного програмного комплексу як інструментарію дослідження систем генерування подібного класу.

#### Висновки

1. Запропонована математична модель генератора стабільної частоти позитивно відрізняється від аналогів [1,2] наявністю рушія ротора генератора, що істотно розширює можливості дослідження електромеханічних процесів цих систем.

2. Математична модель ГСЧ з БКМЗ розроблена на підставі методу вузлових уточнень струмів, що на

відміну від аналогів цієї моделі [1,2] дає змогу моделювати довготривалі електромагнітні та електромеханічні процеси, які відбуваються в цих системах.

3. Математична модель комутатора, який є структурним елементом ГСЧ, розроблена на підставі вихідних допущень, які на відміну від допущень базових моделей [1,2], дають змогу врахувати час відновлення властивостей вентилів для їх запертого стану. Це підвищує рівень адекватності моделі комутатора та розширює можливості дослідження, зокрема стосовно комутаційних перенапруг.

4. Запропонована математична модель ГСЧ дає змогу виконувати всебічні дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів неробочого ходу генератора з врахуванням функціонування рушія та системи автоматичного керування.

#### Список використаної літератури

1. Василів К. М. Математична модель безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // *Технічна електродинаміка: Тематич. вип. „Силова електроніка та енергоефективність”*. – 2003. – Ч. 3. – С. 72–79.
2. Василів К. М. Математична модель генератора стабільної частоти на базі каскадного трипульсного електромашинного модулятора / К. М. Василів, О. М. Галиновський // *Вісн. Нац. ун-ту „Львівська політехніка”: Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – Львів: НУ „ЛП”. – 2000. – № 403. – С. 11–20.
3. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Василів Карл Миколайович. – К.: 2010. – 398 с.
4. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / А.М.Галиновский // *Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромеханотронике*. – Санкт-Петербургский гос. эл.техн. ун-т. –1997. – С.182 – 192.
5. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинновентильных систем / Е.Г.Плахтына – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.

Отримано 12.07.2011



Василів Карл Миколайович,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
обчислювальної техніки і  
моделювання технологічних  
процесів Нац. лісотехн.  
ун-ту України,  
м. Львів, вул. Коломийська,  
4, 140,  
тел. (032) 222-64-03,  
0972453821,  
e-mail: vasyliv\_karl@ukr.net