

УДК 621.313.333: 621.314.54: 621.316.765

К. М. Василів, д-р техн. наук

УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА

Анотація. Запропоновано математичну модель автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем, яка дає змогу моделювати динамічні процеси з врахуванням наявності рушія ротора генератора, взаємного впливу її структурних елементів та функціонування систем автоматичного керування.

Ключові слова: математична модель, автономна система електроживлення, асинхронізований генератор, каскадний модулятор, циклоконвертор.

К.М. Vasyliv, ScD.

GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE AUTONOMOUS POWER SYSTEM BASED ON ASYNCHRONOUS GENERATOR

Abstract. A mathematical model is proposed for the autonomous power system based on asynchronous generator with contactless cascade modulated energizer that enables simulating the dynamic processes taking into account the presence of engine rotor of generator, the mutual influence of its structural elements and operation of automatic control systems.

Keywords: mathematical model, an autonomous power supply system, asinhronizirovaniy generator, a cascade modulator tsiklokonverter.

К. Н. Васильев, д-р техн. наук

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА БАЗЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА

Аннотация. Предложена математическая модель автономной системы электропитания на базе асинхронизированного генератора с бесконтактным каскадным модулированным возбудителем, позволяющая моделировать динамические процессы с учетом наличия движителя ротора генератора, взаимного влияния ее структурных элементов и функционирования системы автоматического управления.

Ключевые слова: математическая модель, автономная система электропитания, асинхронизированный генератор, каскадный модулятор, циклоконвертер.

Постановка проблеми. В сучасній електроенергетиці потужності автономних систем електроживлення (АСЕЖ) становлять вагомую долю загальної системи генерування та споживання електричної енергії, а їх використання достатньо широко практикується в багатьох галузях народного господарства.

Автономним системам електроживлення з погляду умов експлуатації та принципу функціонування притаманна низка специфічних особливостей, до основних з яких належать: робота генератора в режимі граничних навантажень, що робить актуальною проблему надійності функціонування генератора, а також істотне коливання швидкості обертання рушія, що спричиняє іншу складну проблему – нестабільність частоти напруги.

Аналіз наукової літератури та практичних рішень показують, що ці складні і актуальні проблеми можуть бути ефективно вирішені використанням у АСЕЖ асинхронізованих генераторів (АСГ).

Впровадження АСГ стало позитивною тенденцією в розвитку електроенергетики загалом та автономної електроенергетики зокрема. Ідея застосування АСГ перебуває в стані постійного еволюційного розвитку. На сьогодні один із перспективних варіантів створення АСГ вбачається в формуванні системи АСГ на базі безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БКМЗ) [6].

Гіпотетично саме АСГ на базі БКМЗ дають змогу забезпечити високу надійність роботи генератора завдяки безконтактному варіанту виконання та ефективно вирішити іншу важливу проблему – стабілізування частоти напруги при змінній швидкості обертання рушія.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автор протягом останніх років виконав значний обсяг робіт, пов'язаних з розробкою математичних моделей автономних систем електроживлення на базі генераторів із БКМЗ. Ці математичні моделі слугують ефективним інструментарієм дослідження зазначених систем методом математичного експерименту за допомогою комп'ютерів. Так, у [2] розроблено математичну модель автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-

© Василів К. М., 2011

трифазним БКМЗ. У [1] розроблено математичну модель аналогічної автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним БКМЗ. Ці математичні моделі АСЕЖ на базі БКМЗ дають змогу виконувати всебічні дослідження стосовно вивчення закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в згаданих системах. Але цим моделям властиві певні обмеження, які полягають у тому, що дослідження можуть виконуватися лише за умови постійного ковзання, хоча і для різних його значень. Ще одним недоліком математичних моделей [3,4] є те, що в цих моделях не передбачено наявності рушія ротора генератора, що істотно обмежує їх можливості, бо стверджувати про повноцінне дослідження цих автономних систем електроживлення можна лише за умови всебічного вивчення їх поведінки та функціонування загалом з врахуванням рушія ротора генератора.

Безумовно, що такі обмеження становили істотний недолік математичних моделей. Тому на наступному етапі були розроблені математичні моделі, які дають змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси (тобто при змінній швидкості обертання ротора генератора), які відбуваються в АСЕЖ як на базі АСГ з трифазно-трифазними, так на базі АСГ з двофазно-трифазними [5] БКМЗ.

Викладення матеріалу. Об'єктом дослідження є автономна система електроживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ, комутатором якого виконує роль безпосередній тиристорний перетворювач частоти за двонульовою схемою. Схема силового електричного кола такої системи живлення зображена на рис.1. Її структурні елементи: трифазно-трифазний модулятор, що складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розділені на три гілки та з'єднані в один спільний вузол; джерело живлення цих машин $E1$ та $E2$ відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ – асинхронна машина, дві обмотки ротора якої з'єднані в дві окремі зірки. До цієї системи живлення також входять споживачі: три асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3; активно-індуктивне навантаження Н, фільтр Ф – батарея конденсаторів. Передбачена також можливість роботи АСГ паралельно з трифазною електричною мережею М.

Окрім описаних вище ідентифікаторів структурних елементів АСЕЖ, на схемі рис.1 прийняті відповідні позначення електричних координат та інших компонентів схеми. Літерами φ , i , E ,

L , C позначено: потенціали, струми, електрорушійні сили, індуктивності та ємності, а літерою K – ключі схеми. Літерами F , G , D , M , H , C у нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, асинхронних двигунів, електричної мережі з боку статора генератора, активно-індуктивного навантаження та фільтра. На схемі та в подальших викладках літерами S , R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначено номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 у нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2, джерел живлення модулятора $E1$ і $E2$ та асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3.

Зі схеми силового електричного кола системи живлення (рис. 1) видно, що фазні гілки роторних обмоток машин модулятора з'єднані в один спільний вузол, який на схемі позначено через φ_0 . Його прийнято за залежний вузол схеми. Зазначимо, що цей варіант з'єднання фазних гілок роторних обмоток машин модулятора є лише одним з трьох можливих. Окрім цього варіанта передбачено ще комбіноване з'єднання з розподіленням потенціалів та пофазно-групове з'єднання [5]. Кожен із варіантів цих з'єднань утворює іншу схему силового електричного кола системи живлення, що істотно впливає на перебіг електромагнітних процесів, а це дає підстави утворені таким чином системи розглядати як окремі підвиди АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ.

Ключі $K_1 \div K_6$ призначені для вмикання та вимикання споживачів. При цьому ключами $K_1 \div K_3$ вмикаються та вимикаються три асинхронні двигуни АД1 \div АД3 відповідно, а вимикачами $K_4 \div K_6$ – решта споживачів: електрична мережа, статичне навантаження та фільтр відповідно.

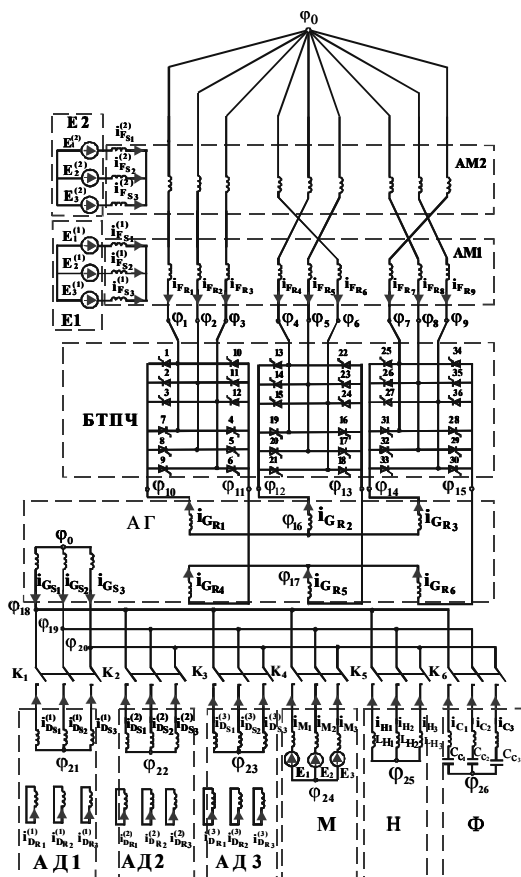


Рис.1. Схема силового електричного кола АСЕЖ

Математичною моделлю АСЕЖ є система диференціальних рівнянь електричної рівноваги, яка описує схему силового електричного кола, система диференціальних рівнянь механічної рівноваги, яка описує динаміку зміни швидкості обертання вала АСГ, диференціальні рівняння, які описують зміну частоти напруги заповнення та кута вентилів БТПЧ, а також система логічних рівнянь, які описують роботу системи керування БТПЧ та рівняння, які моделюють роботу систем автоматичного керування (САК) напруги або струму генератора та САК швидкості обертання ротора генератора.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги структурних елементів силової схеми електричного кола піддослідної системи записано на підставі законів Кірхгофа та згідно з методом вузлових потенціалів [7]. Рівняння для електричних машин наведено з врахуванням усіх наявних електромагнітних зв'язків між контурами кожної з машин.

Повна система рівнянь електричної рівноваги системи живлення в базисі електричних потенціалів незалежних вузлів для схеми силового електричного кола рис.1 у матричній формі має такий вигляд:

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

де A – матриця коефіцієнтів, $\varphi = (\varphi_1 \div \varphi_{26})$ – вектор електричних потенціалів незалежних вузлів схеми силового електричного кола системи; B – вектор вільних членів.

Більш докладно описувати систему рівнянь електричної рівноваги, та інші системи рівнянь, які входять у математичну модель АСЕЖ за винятком рівняння механічної рівноваги для генератора, нема потреби, оскільки вони описані в публікаціях [2,4,5]. Звернемо увагу на те, що в запропонованій математичній моделі зроблено акцент на моделювання рушія. Тому зараз перейдемо безпосередньо до викладу частини математичної моделі, яка стосується саме механічного рушія ротора генератора включно з системою автоматичного керування швидкості обертання ротора генератора.

Отже, рушія ротора генератора представимо джерелом механічного моменту, крутний механічний момент якого прикладається до вала ротора генератора. Тому механічну рівновагу ротора генератора опишемо диференціальним рівнянням такого вигляду:

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

де J – приведений сумарний момент інерції обертових махових мас, розміщених на валі генератора (маси ротора генератора, маси роторів асинхронних машин модулятора та рушія ротора генератора); M_H – статичний момент навантаження (сумарний момент, який відповідає втратам механічної енергії, наприклад момент тертя); M_F – сумарний електромагнітний момент машин модулятора; M_G – електромагнітний момент генератора.; M_R – крутний механічний момент рушія вала ротора генератора.

Невідомим у цьому рівнянні є $p\omega_G = \frac{d\omega_G}{dt}$ – похідна за часом t кутової швидкості обертання вала ротора генератора. Момент інерції обертових махових мас J та статичний момент навантаження M_H тут розглядаються як сталі та відомі величини.

Для визначення похідної швидкості обертання вала ротора генератора необхідно мати вирази для електромагнітного моменту генератора M_G та сумарного електромагнітного моменту машин модулятора M_F .

Враховуючи те, що на роторі генератора є дві обмотки, електромагнітний момент генератора визначимо як такий, що складається з двох компонент, утворених за участю струмів двох роторних обмоток, фази кожної з яких з'єднані в окремі зірки. Тобто

$$M_G = M_{G1} + M_{G2}, \quad (3)$$

де M_G – повний електромагнітний момент генератора; M_{G1} , M_{G2} – електромагнітні моменти від першої обмотки і другої обмоток ротора генератора відповідно.

Запишемо формули для визначення двох компонент електромагнітного моменту генератора. На підставі [8] вони мають такий вигляд:

$$M_{G1} = \frac{3}{2} \cdot P_{G0} \cdot \frac{L_{Gm}}{K_{Gi}} \cdot (T_{GX} \cdot T_{GYR1} - T_{GY} \cdot T_{GXR1});$$

$$M_{G2} = \frac{3}{2} \cdot P_{G0} \cdot \frac{L_{Gm}}{K_{Gi}} \cdot (T_{GX} \cdot T_{GYR2} - T_{GY} \cdot T_{GXR2}), \quad (4)$$

де

$$T_{GX} = \frac{2}{3} \cdot (i_{GS1}^{(1)} - \frac{i_{GS3}}{2} - \frac{i_{GS2}}{2}); \quad T_{GY} = \frac{i_{GS2} - i_{GS3}}{\sqrt{3}};$$

$$T_{GXR1} = \frac{2}{3} \cdot [i_{GR1} \cdot \cos(\gamma_G) + i_{GR3} \cdot \cos(\gamma_G + \rho) + i_{GR2} \cdot \cos(\gamma_G - \rho)];$$

$$T_{GYR1} = \frac{2}{3} \cdot [i_{GR1} \cdot \sin(\gamma_G) + i_{GR3} \cdot \sin(\gamma_G + \rho) + i_{GR2} \cdot \sin(\gamma_G - \rho)]; \quad (5)$$

$$T_{GXR2} = \frac{2}{3} \cdot [i_{GR4} \cdot \cos(\gamma_G) + i_{GR6} \cdot \cos(\gamma_G + \rho) + i_{GR5} \cdot \cos(\gamma_G - \rho)];$$

$$T_{GYR2} = \frac{2}{3} \cdot [i_{FR4} \cdot \sin(\gamma_G) + i_{FR6} \cdot \sin(\gamma_G + \rho) + i_{FR5} \cdot \sin(\gamma_G - \rho)], \quad (6)$$

де

$i_{GS1}, i_{GS2}, i_{GS3}, i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}, i_{GR4}, i_{GR5}, i_{GR6}, \gamma_G$ – фазні струми статора, ротора та електричний кут повороту ротора генератора; $\rho = 2/3 \cdot \pi$ – електричний кут зсуву між фазами статора і ротора генератора.

Аналогічним чином записується формула для визначення сумарного електромагнітного моменту машин модулятора AM1 і AM2:

$$M_F = M_F^{(1)} + M_F^{(2)}, \quad (5)$$

де

$$M_F^{(1)} = M_{F1}^{(1)} + M_{F2}^{(1)} + M_{F3}^{(1)};$$

$$M_F^{(2)} = M_{F1}^{(2)} + M_{F2}^{(2)} + M_{F3}^{(2)} \quad (6)$$

електромагнітні моменти першої та другої машин модулятора.

З рівняння (6) видно, що електромагнітні моменти кожної з двох машин AM1 і AM2 мають по три складові, оскільки роторні обмотки цих машин розділені на три фазні гілки. Тому сумарний електромагнітний момент кожної з цих двох

машин утворюється трьома складовими, кожна з яких виникає в результаті взаємодії електромагнітного поля обмотки статора і електромагнітного поля кожної з трьох систем фазних гілок роторів машин модулятора. Оскільки ці формули отримані з аналогічних міркувань та згідно з [8] як і для генератора, а самі вони відносно громіздкі, то наводити їх тут недоцільно.

Перейдемо до розгляду системи автоматичного керування, призначення якої полягає в стабілізації швидкості обертання ротора генератора. Вище йшлося про те, що в АСЕЖ функціонує САК стабілізації швидкості обертання ротора генератора, завдання якої полягає в підтриманні заданого значення швидкості обертання ротора генератора шляхом регулювання величини крутного механічного моменту. Структурна схема САК швидкості ротора АСГ зображена на рис. 2, на якому ω_{G3} , ω_G – відповідно задана та реальна швидкості ротора генератора;

$$\Delta\omega_G = \omega_{G3} - \omega_G \quad (7)$$

відхилення швидкості ротора АСГ від заданого її значення.

Система автоматичного стабілізації швидкості обертання ротора генератора реалізована пропорційно-інтегральним регулятором. Виходячи з цього та рис. 2, поточне значення механічного крутного моменту визначаємо за такою формулою:

$$M_R = K_p^{\omega}(\omega_{G3} - \omega_G) + K_i^{\omega} \int (\omega_{G3} - \omega_G) dt + M_0, \quad (8)$$

де K_p^{ω} , K_i^{ω} – коефіцієнти пропорційного та інтегрального регуляторів швидкості обертання ротора АСГ; M_0 – початкове значення крутного механічного моменту.

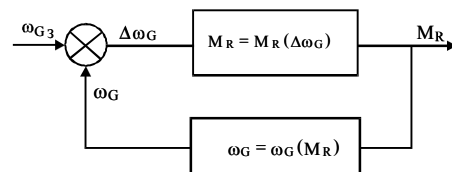


Рис.2. Структурна схема САК швидкості ротора генератора

Стосовно опису математичної моделі рушія та САК швидкості обертання ротора генератора зазначимо, що задане значення швидкості ω_{G3} фігурує в математичній моделі АСЕЖ як функція часу, яка задається у вигляді таблиці. Таким чином, математична модель дає змогу моделювати процеси, що відбуваються в піддослідній АСЕЖ, виходячи з бажаної швидкості обертання (наприклад синхронної), що актуально для АСЕЖ, генератори яких приводяться в рух двигунами внутрішнього згорання чи газовими турбінами, або

моделювати довільну апіорі очікувану функцію заданого значення швидкості (це відповідає умовам роботи вітрових електроенергетичних установок), задаючи довільний закон зміни функції ω_{G3} .

На завершення опису математичної моделі піддослідної автономної системи електроживлення зазначимо, що ця математична модель стосовно циклоконвертора на відміну від попередніх аналогів розроблена, виходячи з вихідних допущень, що уможливають урахування явища відновлення властивостей вентилів для їх запертого стану під час комутування [5]. Окрім цього тут також виконується процедура вузлових уточнень струмів, яка дає змогу уникнути складної проблеми числової нестійкості.

Таким чином, окрім наявності рушія ротора генератора, запропонована математична модель АСЕЖ завдяки двом останнім вдосконаленням (моделювання комутатора та уточнення струмів) відрізняється від своїх аналогів вищим рівнем адекватності стосовно моделювання довготривалих електромагнітних та електромеханічних процесів.

Вхідними даними для розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів слугують такі величини: каталожні параметри електричних машин (АСГ, АМ1, АМ2, АД1, АД2, АД3), параметри мережі, активно-індуктивного навантаження, фільтра та вентилів. Функціональні залежності від часу заданих значень амплітуди напруги або струму статора генератора та значень швидкості обертання ротора генератора, коефіцієнти регуляторів, масив стану вентилів IT розмірністю 36, а також початкові умови, що входять до вектора інтегрованих змінних V , який водночас є і результатом розрахунків електромагнітних та електромеханічних процесів. Сам вектор інтегрованих змінних V має таку структуру:

$$V = (i_{FS}^{(1)}, i_{FS}^{(2)}, i_{FR}, \gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \omega_F, iT, \\ i_{GS}, i_{GR}, \gamma_G, \omega_G, i_{DS}^{(1)}, i_{DR}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, \\ i_{DS}^{(2)}, i_{DR}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}, i_{DS}^{(3)}, i_{DR}^{(3)}, \gamma_D^{(3)}, \omega_D^{(3)}, \\ i_M, i_H, i_C, u_C^e, \int (\omega_{G3} - \omega_G) dt, \int (i_{GS}^v - i_3) dt, \\ \int (u_{GS}^v - u_3) dt, f_z, \gamma_z, t), \quad (8)$$

де $i_{FS}^{(1)} = (i_{FS1}^{(1)}, i_{FS2}^{(1)}, i_{FS3}^{(1)})$, $i_{FS}^{(2)} = (i_{FS1}^{(2)}, i_{FS2}^{(2)}, i_{FS3}^{(2)})$ – вектори струмів контурів статорів АМ1, АМ2; $i_{FR} = (i_{FR1}, i_{FR2}, i_{FR3}, i_{FR4}, i_{FR5}, i_{FR6}, i_{FR7}, i_{FR8}, i_{FR9})$ – вектор струмів контурів ротора модулятора; iT – вектор розмірністю 36 струмів тиристорних гілок комутатора;

$i_{GR} = (i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}, i_{GR4}, i_{GR5}, i_{GR6})$, $i_{GS} = (i_{GS1}, i_{GS2}, i_{GS3})$ – вектори струмів контурів ротора і статора генератора; $i_{DS}^{(1)} = (i_{DS1}^{(1)}, i_{DS2}^{(1)}, i_{DS3}^{(1)})$, $i_{DR}^{(1)} = (i_{DR1}^{(1)}, i_{DR2}^{(1)}, i_{DR3}^{(1)})$ – вектори струмів контурів статора і ротора АД1; $i_{DS}^{(2)}, i_{DR}^{(2)}, i_{DS}^{(3)}, i_{DR}^{(3)}$ – вектори струмів АД2 та АД3 (мають аналогічну структуру до АД1 див. схему рис.1); iM, iH, iC – вектори струмів електричної мережі, активно-індуктивного навантаження та фільтра; $\gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \gamma_G, \gamma_D^{(1)}, \gamma_D^{(2)}, \gamma_D^{(3)}$ – електричні кути повороту роторів АМ1, АМ2, АГ та асинхронних двигунів АД1, АД2, АД3 відповідно; $\omega_F, \omega_G, \omega_D^{(1)}, \omega_D^{(2)}, \omega_D^{(3)}$ – механічна частота обертання роторів машин модулятора, генератора та асинхронних двигунів; i_{GS}^v, u_{GS}^v – модулі зображувальних векторів струму та напруги статора генератора; t – час інтегрування.

Наявної інформації цілком достатньо для формулювання алгоритму розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються в піддослідній автономній системі електроживлення. Цей алгоритм є таким:

- на підставі каталожних параметрів структурних елементів АСЕЖ, початкових умов для відповідного моменту часу (вектора V) та стану вентилів (масиву IT) формується система рівнянь електричної рівноваги (1), яка розв'язується відносно вектора потенціалів незалежних вузлів ϕ ;

- формується та розв'язується система рівнянь механічної рівноваги всіх машин, які входять до АСЕЖ;

- на зворотному шляху визначається вектор інтегрування pV , який є похідною вектора V за часом t ;

- одним із явних методів числового інтегрування системи диференціальних рівнянь визначається нові значення вектора інтегрованих змінних V для визначеного кроку інтегрування Δt , а також новий стан вентилів комутатора (масив IT);

- формується та розв'язується система рівнянь вузлових уточнень струмів;

- цей процес триває в межах заданого вхідними даними кінцевого значення часу інтегрування.

На підставі описаної вище математичної моделі розроблено програмний комплекс мовою програмування FORTRAN.

За допомогою математичної моделі та відповідного комплексу програм на комп'ютері досліджено принципи теоретичні положення, на яких ґрунтується функціонування автономної

системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ.

Для ілюстрації адекватності математичної моделі та дієздатності програмного комплексу наводимо результати розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей від часу миттєвих значень всіх координат, які входять до вектора інтегрованих змінних V , а також електричних напруг, електромагнітних моментів та деяких інших координат.

Результати розрахунку основних координат АСЕЖ у вигляді графіків зображено на рис. 3–5. Моделювання процесів виконаємо для режиму, в якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та виконується розгін ротора генератора. При досягненні швидкості обертання ротора генератора близької до синхронної, вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження.

На наступній стадії робочого циклу системи виконується почергове вмикання асинхронних двигунів і статичного навантаження, а на останньому етапі – почергове від'єднання раніше ввімкнених споживачів. Протягом цілого робочого циклу функціонують системи автоматичного керування для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ. Зазначимо, що саме такого режиму потрібно дотримуватися під час пуску асинхронізованого генератора в реальній системі електроживлення, щоб уникнути стрибків напруг у контурах машин модулятора та генератора.

На рис. 3 зображено розрахункову залежність кутової швидкості обертання ротора АСГ. Як видно з цього рисунка, синхронного значення швидкості досягає в околі моменту часу $t = 5,0$ с. В момент вмикання споживачів швидкість рушія, а значить і ротора генератора стрибкоподібно зменшується, що призводить до відповідної реакції системи у вигляді зміни характеру основних координат. Так, на рис. 4 зображено розрахункові залежності $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_{\mu}^v$ – модулів зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та півсум струмів однойменних фазних гілок ротора генератора. З цього рисунка видно, що сис-

тема автоматичного керування виконує функцію стабілізування амплітуди напруги статора генератора, а інші координати (струми) відображають поведінку системи в межах робочого циклу (неробочого ходу, почергового вмикання споживачів, роботи в режимі повного навантаження та почергового від'єднання споживачів).

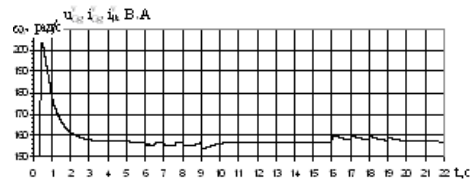


Рис. 3. Графік кутової швидкості ротора генератора

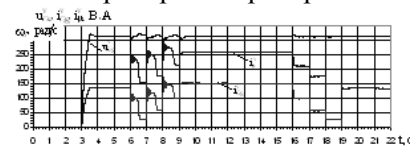


Рис. 4. Графіки модулів зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та півсум струмів фазних гілок ротора генератора

Принципово важливу інформацію з погляду перебігу електромагнітних процесів і функціонування автономної системи електроживлення загалом несуть розрахункові залежності фазних струмів ротора генератора.

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

$$i_{\mu 1} = \frac{i_{GR1} + i_{GR4}}{2}; \quad i_{\mu 2} = \frac{i_{GR2} + i_{GR5}}{2}; \quad i_{\mu 3} = \frac{i_{GR3} + i_{GR6}}{2}.$$

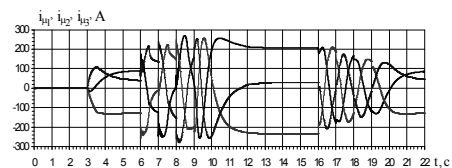


Рис.5. Графіки півсум струмів та однойменних фаз обмоток ротора генератора

З цього рисунка видно, що частота струмів дорівнює частоті ковзання, тобто визначається швидкістю обертання ротора генератора. Для синхронної швидкості (коли ковзання генератора дорівнює нулю) частота струмів ротора генератора також дорівнює нулю, тобто маємо випрямлений струм, а під час коливання швидкості ці струми змінюються з частотою ковзання.

Розрахункові залежності основних координат, які зображено на рис. 3–5, дають достатньо повну уяву як про функціонування автономної системи електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним мо-

дульованим збуджувачем 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 електроживлення подібного класу, зокрема.

Висновки

1. Запропонована математична модель автономної системи електроживлення позитивно відрізняється від аналогів [3,4] наявністю рушія ротора генератора, що істотно розширює можливості дослідження електромеханічних процесів цих систем з приводом від двигунів внутрішнього згорання та газових турбін.

2. Математична модель АСЕЖ на базі АСТ з БКМЗ розроблена на підставі методу вузлових уточнень струмів, що, на відміну від аналогів цієї моделі [2,4], дає змогу моделювати довготривалі електромагнітні та електромеханічні процеси, які відбуваються в цих системах, що має принципово важливе значення в питаннях дослідження.

3. Математична модель комутатора, який є структурним елементом АСЕЖ, розроблена на підставі вихідних допущень, які на відміну від допущень базових моделей 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 автономної системи електроживлення дає змогу виконувати всебічні дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів з врахуванням рушія ротора генератора та системи автоматичного керування як у нормальних, так і в екстремальних симетричних та несиметричних режимах.

Список використаної літератури

1. Василів К. М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 6. – С.31–37.

2. Василів К. М. Математична модель автономної електроенергетичної системи „Асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів” / К. М. Василів, О. М. Галиновський // Праці Ін-ту ел. динаміки НАНУ: Електродинаміка. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України. – 2000. – С.153–163.

3. Василів К. М. Математична модель дина-

мічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С.54–60.

4. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К. М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С.50–55.

5. 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.

6. Галиновский А. М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / А.М. Галиновский. // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромехатронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С.182 – 192.

7. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.

8. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р.В. Фильц. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.

Отримано 12.07.2011

References

1. Vasilev K. M. Mathematical model of an autonomous power system based on generating π -three leading with two-phase-modulated three-phase contactless energizer / Physics. – 2002. – № 6. – P.31–37 [in Ukrainian].

2. Vasilev K.M., Halinovsky A.M. Mathematical model of an autonomous electrical power system "asynchronous generator with trypulsnym modulated energizer – Cascade Asynchronous engines" / Proceedings of the Institute of Electrodynamics NASU: Electrodynamics. Киев.: Institute of elec TRO dynamics of NAS of Ukraine. – 2000. – P.153–163 [in Ukrainian].

3. Vasilev K. M. Mathematical model of dynamic processes of autonomous electric power system based on contactless asynchronous generator with a two-phase-modulated three-phase cascade energizer MM // Physics. – 2005. – № 2. – P.54–60

[in Ukrainian].

4. Vasilev K. M. Mathematical model of dynamic processes of electron troenerhe-tychnoyi autonomous system based on contact-less asynchronous generator with three phase-three phase cascade modulated energizer MM / Physics. – 2004. – № 5. – P.50–55 [in Ukrainian].

5. Vasilev K. M. Methods and models of analysis of the autonomous power systems based on asynchronous generator with contactless cascade modulated zbudzhuvachekm: dis. Dr. techn. Sciences: 05.09.03 / Charles N. Vasilev. – Kiev: – 2010. – 398 p. [in Ukrainian].

6. Halynovskyu A.M Contactless asynhronyzyrovannyy generator with converter modulyrovannym chastoty / Proceedings And an international (Third All-Russian) conference on Elektromehanotronyke. – St.Petersburg state. elektrotehn. University of. – 1997. – P.182–192 [in Russian].

7. Plahtyna EG mathematical modeling of electric noven you are systems. – Lions: Higher HQ. Izd in Lvov. University of fact, 1986. – 164 p. [in Russian].

8. Fylts R.V. Mathematical bases theory of electromechanic converters. – Kyiv: Naukova Dumka, 1979. – 208 p. [in Russian].



Василів Карл Миколайович,
д-р техн. наук, проф. каф. обчислюв. техн. і моделюван. технологічн. процесів нац. лісотехн. уні-ту України,
м.Львів, вул.Коломийська, 4,140
тел. (032) 222-64-03, 0972453821,
e-mail: vasyliv_karl@ukr.net