

УДК 621.313.333

К.М. Василів, О.М. ГаліновськийУкраїнський державний лісотехнічний університет
Національний технічний університет України “КПІ”**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
БЕЗКОНТАКТНОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА
З МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ НА БАЗІ ТРИФАЗНО-
ТРИФАЗНОГО НУЛЬОВОГО ЦИКЛОКОНВЕРТОРА**

© Василів К.М., Галіновський О.М., 2003

Розроблено математичну модель безконтактного асинхронізованого генератора з каскадним модульованим збуджувачем на базі трифазно-трифазного тиристорного перетворювача частоти з природною комутацією. Модель дозволяє розраховувати електромагнітні процеси у динамічних режимах роботи генератора.

A mathematical model of a non – contact asynchronous generator with a cascade modulated exciter on the base of the threephase – threephase direct thyristor transformer of frequency with natural commutation was proposed. His model allows to investigate electromagnetic processes in dynamic rate of generator operation.

Постановка проблеми. Характерною особливістю сьогоденного стану електроенергетики є активне впровадження у практику використання асинхронізованих генераторів (АСГ). Такі генератори дедалі частіше застосовують як у потужних стаціонарних, так і в автономних електроенергетичних системах (АЕЕС). Для АЕЕС надзвичайно актуальною є проблема забезпечення стабільності частоти генерованої напруги за умови змінної швидкості обертання ротора. Крім цього, для АСГ, що функціонують в умовах АЕЕС, особливої уваги вимагають системи збудження. Однією з найважливіших вимог, що ставляться до систем збудження АСГ з одно- та двозонним діапазоном зміни швидкості обертання (вище і нижче синхронної) є забезпечення високої якості форми кривих струмів збудження при змінному ковзанні, що принципово відрізняє вимоги до систем збудження керованих електроприводів.

Аналіз науково-технічної літератури та принципів функціонування існуючих систем збудження показує, що однією з найефективніших систем збудження, яка задовольняє зазначені вимоги, є система безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БМЗ) [1]. Характерною особливістю БМЗ є наявність у їх структурі модулятора та безпосереднього тиристорного перетворювача частоти з природною комутацією (БТПЧ), що забезпечує простоту системи керування та високу якість струму з боку низької частоти, а це, у свою чергу, є важливою передумовою отримання високоякісної напруги генератора, включаючи її стабільність частоти.

Однією з можливих схем АСГ з БМЗ є схема, у якій передбачено з'єднання обмоток ротора генератора у одну зірку, живлення до якої подається від нульового трифазно-трифазного БТПЧ. Передбачається, що саме така схема максимально забезпечує стійкість роботи генератора та високу якість напруги. Для з'ясування повною мірою працездатності АСГ за такою схемою необхідно здійснити спеціальні дослідження. А для підвищення

ефективності дослідницьких та проектно-конструкторських робіт слід впровадити у практику дослідження та конструювання математичного моделювання з використанням комп'ютерної техніки. Розробка математичних моделей, крім цього, слугувала б розвиткові теорії генеруючих систем на базі БМЗ.

Аналіз останніх досліджень. Авторами статті протягом останніх років виконано значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей автономних електроенергетичних систем на базі генераторів з БМЗ. Виконується робота з дослідження цих систем, зокрема на комп'ютері методом математичного моделювання. Так, у [2, 3] розроблено математичні моделі автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БМЗ. У [4, 5] розроблено математичні моделі аналогічної автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним БМЗ.

Ці математичні моделі дозволили виконати значний обсяг досліджень електромагнітних процесів, що відбуваються у зазначених системах, з врахуванням таких важливих факторів, як взаємний вплив структурних елементів, роботи системи керування комутатором, яким є безпосередній тиристорний перетворювач частоти, вплив системи автоматичного керування, призначеної для стабілізування амплітуди напруги при роботі генератора на активно-індуктивне навантаження та при пуску асинхронних двигунів.

Задачі досліджень. Розроблені математичні моделі окреслюють визначений етап робіт, на якому ставилося завдання забезпечити можливість моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів для постійного ковзання (хоча діапазон ковзання обмежувався лише принципом функціонування системи). Отже, незважаючи на високий рівень адекватності цих моделей та достатньо високі можливості взагалі, ці моделі не надавали можливості моделювання динамічних режимів роботи АСГ з БМЗ, тобто режимів для змінного ковзання. Враховуючи те, що для АЕЕС робота у режимі змінного ковзання триває постійно, то вивчення поведінки систем саме у таких режимах є безумовно необхідним, а розробка математичних моделей АСГ на базі БМЗ є актуальною науковою проблемою.

Метою статті є розробка математичної моделі та відповідного програмного комплексу для дослідження на комп'ютері динамічних електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються у асинхронізованому генераторі з БМЗ на базі нульового безпосереднього тиристорного перетворювача частоти при змінному у часі ковзанні.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є асинхронізований генератор з БМЗ на базі трифазно-трифазного безпосереднього тиристорного перетворювача частоти. Схема силового електричного кола такого генератора зображена на рис. 1.

Структурними елементами асинхронізованого генератора є: трифазно-трифазний модулятор, що складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2 з розщепленими на три вітки обмотками роторів і мереж живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти БТПЧ; генератор АГ, яким є асинхронна машина (АМ) з з'єднаними у одну зірку фазними обмотками ротора. Розщеплені вітки роторів машин модулятора АМ1 та АМ2 з'єднані між собою послідовно. Обмотка статора генератора вважається розімкненою.

На схемі рис. 1 прийняті такі позначення: буквами ϕ, i, E позначено потенціали, струми та електрорушійні сили, а буквою K позначено ключі схеми. Буквами: F та G у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до модулятора та генератора. Буквами S, R у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора машин

(AM1, AM2 та АГ). Цифрами у нижніх індексах позначено номери електричних віток у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 у нижньому індексі позначені вузли з нульовим потенціалом. Цифрами у круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2. Кількість штрихів у верхньому індексі відповідає номеру варіанта з'єднань розщеплених віток обмоток ротора АМ2.

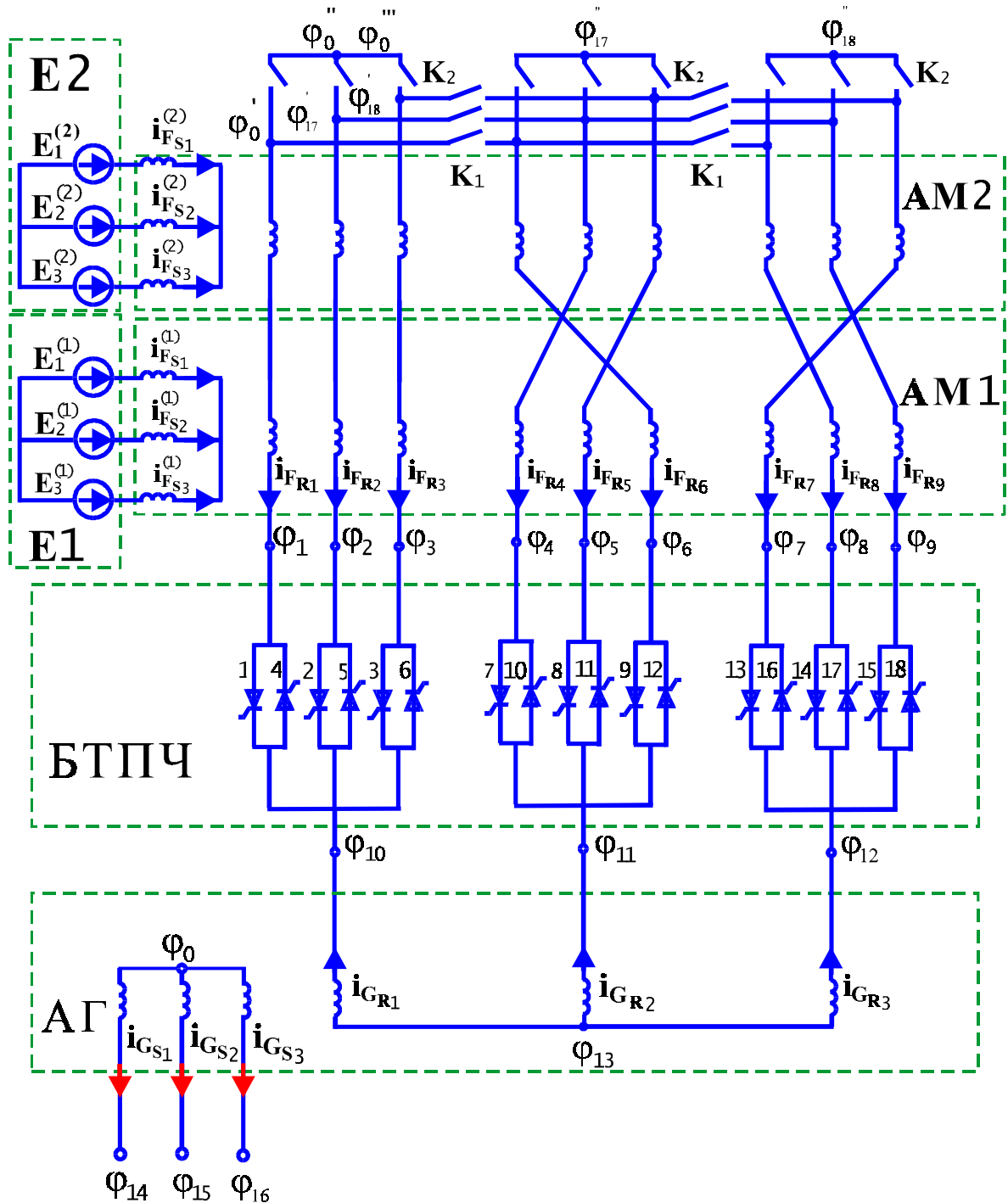


Рис. 1. Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора з БМЗ

У схемі модулятора передбачено три варіанти з'єднання роторних обмоток АМ2: перший з них забезпечує комбіноване з'єднання ($K_F=1$), коли ключі K_2 – розімкнені, а ключі K_1 – замкнені. При цьому у схемі з'являються три вузли з потенціалами: ϕ'_0 , ϕ'_{17} , ϕ'_{18} . Приймаємо $\phi'_0=0$. У другому варіанті розщеплені вітки роторних обмоток АМ2 з'єднані у три зірки ($K_F=2$), тобто ключі K_2 замкнені, а ключі K_1 розімкнені. При такому стані ключів з'являються також три вузли з потенціалами: ϕ''_0 , ϕ''_{17} , ϕ''_{18} , де також приймаємо, що утворені вузли будуть розміщені по трьох фазних групах розщеплених віток. І останній, третій, варіант ($K_F=3$) передбачає з'єднання всіх розщеплених віток обмоток ротора АМ2 у спільний вузол з нульовим потенціалом $\phi'''_0=0$, тобто ключі K_1 та K_2 замкнені.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги модулятора. Рівняння електричної рівноваги, записані за другим законом Кірхгофа для контурів статора АМ1 і АМ2, мають такий вигляд:

$$E^{(1)} + L_{FS,S}^{(1)} \dot{\phi}_{FS}^{(1)} + L_{FS,R}^{(1)} \dot{\phi}_{FR} + L_{FS,R}^{(1)} i_{FR} + R_{FS}^{(1)} i_{FS}^{(1)} = 0; \quad (1)$$

$$E^{(2)} + L_{FS,S}^{(2)} \dot{\phi}_{FS}^{(2)} + L_{FS,R}^{(2)} \dot{\phi}_{FR} + L_{FS,R}^{(2)} i_{FR} + R_{FS}^{(2)} i_{FS}^{(2)} = 0. \quad (2)$$

Аналогічно записані диференціальні рівняння електричної рівноваги для контурів ротора

$$\phi_{FR} - \phi_{FK} + L_{FR,S}^{(1)} \dot{\phi}_{FS}^{(1)} + L_{FR,S}^{(2)} \dot{\phi}_{FS}^{(2)} + L_{FR,R} \dot{\phi}_{FR} + L_{FR,S}^{(1)} i_{FS}^{(1)} + L_{FR,S}^{(2)} i_{FS}^{(2)} + R_{FR} i_{FR} = 0. \quad (3)$$

Для отримання повної системи рівнянь електричної рівноваги, рівняння (1)–(3) доповнимо рівняннями для вузлів ротора, записаними за першим законом Кірхгофа та відповідно з [6]. Структура цих рівнянь визначається з'єднанням розщеплених віток ротора АМ2. При комбінованому з'єднанні ($K_F=1$) вони мають такий вигляд:

$$\dot{\phi}_{FR_2} + \dot{\phi}_{FR_4} + \dot{\phi}_{FR_9} = 0; \quad \dot{\phi}_{FR_3} + \dot{\phi}_{FR_5} + \dot{\phi}_{FR_7} = 0. \quad (4)$$

Для окремого з'єднання розщеплених віток ($K_F=2$)

$$\dot{\phi}_{FR_4} + \dot{\phi}_{FR_5} + \dot{\phi}_{FR_6} = 0; \quad \dot{\phi}_{FR_7} + \dot{\phi}_{FR_8} + \dot{\phi}_{FR_9} = 0. \quad (5)$$

У рівняннях (1)–(3) $L_{FS,S}^{(1)}, L_{FS,S}^{(2)}$ – матриці розмірністю 3 на 3 власних індуктивностей контурів статора для АМ1 і АМ2; $L_{FS,R}^{(1)}, L_{FS,R}^{(2)}$ – матриці розмірністю 3 на 9 взаємних індуктивностей між контурами статора і ротора для АМ1 і АМ2; $L_{FR,R}$ – матриця розмірністю 9 на 9 власних індуктивностей контурів ротора $L_{FS,R}^{(1)}, L_{FS,R}^{(2)}$ – похідні матриць $L_{FS,R}^{(1)}$ і $L_{FS,R}^{(2)}$ відповідно за кутами $\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}$ поворотів роторів АМ1 і АМ2; $L_{FR,S}^{(1)}, L_{FR,S}^{(2)}$ – матриці взаємних індуктивностей між контурами ротора і статора для АМ1 і АМ2, а $L_{FR,S}^{(1)}, L_{FR,S}^{(2)}$ – похідні матриць $L_{FR,S}^{(1)}, L_{FR,S}^{(2)}$ за кутами $\gamma^{(1)}$ та $\gamma^{(2)}$. Матриці $L_{FR,S}^{(1)}, L_{FR,S}^{(2)}$ та $L_{FR,S}^{(1)}, L_{FR,S}^{(2)}$ є транспонованими відносно $L_{FS,R}^{(1)}, L_{FS,R}^{(2)}$ та $L_{FS,R}^{(1)}, L_{FS,R}^{(2)}$ відповідно.

Матриці власних і взаємних індуктивностей контурів статора і ротора та матриці похідних взаємних індуктивностей між контурами статора і ротора для АМ1 і АМ2

визначаються на підставі таких каталогових даних: $L_m^{(1)}, L_{S\sigma}^{(1)}, L_{S0}^{(1)}, L_{R\sigma}^{(1)}, L_{R0}^{(1)}$ та $L_m^{(2)}, L_{S\sigma}^{(2)}, L_{S0}^{(2)}, L_{R\sigma}^{(2)}, L_{R0}^{(2)}$ – робочої індуктивності, індуктивностей розсіювання та нульової послідовності статора і ротора.

У вирази матриць взаємних індуктивностей між контурами статора і ротора та похідних цих матриць, а також у вирази матриць власних індуктивностей контурів роторів входять ще такі дані: $K_i^{(1)}, K_i^{(2)}$ – коефіцієнти трансформації та $p_0^{(1)}, p_0^{(2)}$ – кількість пар полюсів для АМ1 та АМ2 відповідно, а також ω_F – механічна частота обертання ротора модулятора.

Решта величин з рівнянь (1)-(3) мають таку структуру: $E^{(1)} = E_M [\sin(\omega t), \sin(\omega t - \rho), \sin(\omega t - 2\rho)]$; $E^{(2)} = E_M [\sin(\omega t), \sin(\omega t - 2\rho), \sin(\omega t - \rho)]$ – вектори електрорушійних сил мережі, де E_M – амплітуда; ω – кругова частота мережі, t – час, а $\rho = 2/3\pi$ – кут зсуву між фазами; $i_{FS}^{(1)} = (i_{FS1}^{(1)}, i_{FS2}^{(1)}, i_{FS3}^{(1)})$, $i_{FS}^{(2)} = (i_{FS1}^{(2)}, i_{FS2}^{(2)}, i_{FS3}^{(2)})$ – 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 АМ1, а $p = d/dt$ – оператор диференціювання за часом t ; $R_{FS}^{(1)} = \text{diag}(R_{FS1}^{(1)}, R_{FS2}^{(1)}, R_{FS3}^{(1)})$; $R_{FS}^{(2)} = \text{diag}(R_{FS1}^{(2)}, R_{FS2}^{(2)}, R_{FS3}^{(2)})$ – діагональні матриці активних опорів статорів АМ1 та АМ2.

Вектори потенціалів у рівнянні (3) для контурів ротора модулятора мають таку структуру: $\varphi_{FR} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9)$ – вектор потенціалів на виході ротора АМ1; $\varphi_{FK} = (0, \dot{\varphi}_{17}, \dot{\varphi}_{18}, \dot{\varphi}_{17}, \dot{\varphi}_{18}, 0, \dot{\varphi}_{18}, 0, \dot{\varphi}_{17})$ – вектор потенціалів з боку ключів контурів ротора АМ2 для комбінованого з'єднання, коли $K_F = 1$; $\varphi_{FK} = (0, 0, 0, \ddot{\varphi}_{17}, \ddot{\varphi}_{17}, \ddot{\varphi}_{17}, \ddot{\varphi}_{18}, \ddot{\varphi}_{18}, \ddot{\varphi}_{18})$ – цей самий вектор для з'єднання, коли $K_F = 2$; $\varphi_{FK} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ – для з'єднання зі спільним нулем, коли $K_F = 3$.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги АГ. Електромагнітні процеси генератора опишемо системою рівнянь електричної рівноваги з подібним підходом, як і для модулятора. Векторні диференціальні рівняння електричної рівноваги для статора і ротора, записані за другим законом Кірхгофа, мають такий вигляд:

$$L_{GS,S} p i_{GS} + L_{GS,R} p i_{GR} + L'_{GS,R} i_{GR} + R_{GS} i_{GS} + \varphi_{GS} = 0; \quad (6)$$

$$L_{GR,S} p i_{GS} + L_{GR,R} p i_{GR} + L'_{GR,S} i_{GS} + R_{GR} i_{GR} + U_{GR} = 0. \quad (7)$$

Система рівнянь (8), (9) має бути доповнена рівнянням для вузла ротора генератора, записаним за першим законом Кірхгофа та відповідно з [6]. Враховуючи те, що контури ротора генератора з'єднані у зірку, це рівняння має такий вигляд.

$$p i_{GR1} + p i_{GR2} + p i_{GR3} = 0. \quad (8)$$

Матриці власних $L_{GS,S}$, $L_{GR,R}$ та $L_{GS,R}$, $L_{GR,S}$ взаємних індуктивностей, а також їх похідних визначаються на підставі аналогічних вхідних даних, як і для модулятора L_m , $L_{S\sigma}$, L_{S0} , $L_{R\sigma}$, L_{R0} . Вектори струмів, потенціалів, напруг та матриці активних опорів мають таку структуру: $i_{GS} = (i_{GS1}, i_{GS2}, i_{GS3})$ – вектор струмів контурів статора;

$i_{GR} = (i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3})$ – вектор струмів контурів ротора; $\varphi_{GS} = (\varphi_{14}, \varphi_{15}, \varphi_{16})$ – вектор потенціалів статора; $R_{GS} = \text{diag}(R_{GS1}, R_{GS2}, R_{GS3})$ – діагональна матриця активних опорів статора; $R_{GR} = \text{diag}(R_{GR1}, R_{GR2}, R_{GR3})$ – діагональна матриця активних опорів контурів ротора генератора; $U_{GR} = (\varphi_{10} - \varphi_{13}, \varphi_{11} - \varphi_{13}, \varphi_{12} - \varphi_{13})$ – вектор напруг ротора генератора.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги БТПЧ. Математична модель циклоконвертора розроблена на підставі вихідних припущень, прийнятих відповідно до методу квазікомбінованих схем і вузлових уточнень струмів [7], згідно з якими для стану провідності вентиля моделюються послідовно з'єднаними активним опором і індуктивністю, значення яких дорівнюють реальному значенню вентиля для цього стану (як і у [6,8]), а для запертого стану вентиля моделюються безмежно великою індуктивністю і активним опором, що відповідає стану провідності.

Комутація вентилів вважається природною, що передбачає запирання тиристора у момент часу переходження струму комутуючого тиристора через нуль з плюса на мінус.

Враховуючи такі припущення, диференціальні рівняння електричної рівноваги для схеми силового електричного кола БТПЧ запишемо згідно з [6, 7] у такому вигляді:

$$p i_{\Pi F} + G_{F,F} \varphi_{FR} + G_{F,G} \varphi_{GR} + T_F = 0; \quad (9)$$

$$p i_{\Pi G} + G_{G,F} \varphi_{FR} + G_{G,G} \varphi_{GR} + T_G = 0. \quad (10)$$

Матриці обернених індуктивностей, вектори вільних членів, струмів і потенціалів мають таку структуру:

$$i_{\Pi F} = -i_{FR}; \quad i_{\Pi G} = -i_{GR}; \quad \varphi_{FR} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9); \quad \varphi_{GR} = (\varphi_{10}, \varphi_{11}, \varphi_{12}).$$

$$G_{F,F} = \text{diag}(g_1 + g_4, g_2 + g_5, g_3 + g_6, g_7 + g_{10}, g_8 + g_{11}, g_9 + g_{12}, g_{13} + g_{16}, g_{14} + g_{17}, g_{15} + g_{18});$$

$$G_{F,G} = \text{diag}(G_1, G_1, G_1),$$

де

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_1 + g_4 \\ g_2 + g_5 \\ g_3 + g_6 \end{bmatrix}; \quad G_2 = \begin{bmatrix} g_7 + g_{10} \\ g_8 + g_{11} \\ g_9 + g_{12} \end{bmatrix}; \quad G_3 = \begin{bmatrix} g_{13} + g_{16} \\ g_{14} + g_{17} \\ g_{15} + g_{18} \end{bmatrix};$$

$G_{G,F}$ – матриця, транспонована відносно $G_{F,G}$; $G_{G,G} = \text{diag}(g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 + g_6; g_7 + g_8 + g_9 + g_{10} + g_{11} + g_{12}; g_{13} + g_{14} + g_{15} + g_{16} + g_{17} + g_{18})$;

$$T_F = (-b_1 + b_4, -b_2 + b_5, -b_3 + b_6, -b_7 + b_{10}, -b_8 + b_{11}, -b_9 + b_{12}, -b_{13} + b_{16}, -b_{14} + b_{17}, -b_{15} + b_{18})$$

$$T_G = (b_1 + b_2 + b_3 - b_4 - b_5 - b_6, b_7 + b_8 + b_9 - b_{10} - b_{11} - b_{12}, b_{13} + b_{14} + b_{15} - b_{16} - b_{17} - b_{18}).$$

Елементи матриць обернених індуктивностей та векторів вільних членів системи рівнянь (9), (10) визначаються за такими формулами:

$$g_j = K_j \frac{1}{L_{Tj}}; \quad b_j = r_{Tj} i_{Tj} K_j \frac{1}{L_{Tj}},$$

де L_{Tj} , R_{Tj} , i_{Tj} , K_j ($j=1, 2, 3, \dots, 18$) – індуктивність, активний опір, струм та ознака стану j -го тиристора.

На підставі диференціальних рівнянь (1)–(5), (6)–(8) та (9)–(10) електричної рівноваги структурних елементів отримаємо остаточно систему рівнянь електричної рівноваги АСГ у базисі електричних потенціалів незалежних вузлів схеми генератора. Для цього виключимо з рівнянь модулятора (1)–(3) вектори $\mathbf{p}i_{FS}^{(1)}$, $\mathbf{p}i_{FS}^{(2)}$ похідних струмів статорів машин АМ1, АМ2 та вектор похідних струмів статора генератора $\mathbf{p}i_{GS}$ з рівнянь (6), (7). Далі, виключимо потенціали φ_{17} , φ_{18} з рівняння (3), що входять у вектор потенціалів Φ_{FK} та отримаємо остаточно систему рівнянь електричної рівноваги генератора. Вона має такий вигляд:

$$A\varphi + B = 0, \quad (11)$$

де A – матриця коефіцієнтів, B – вектор вільних членів, а $\varphi = (\varphi_1 \div \varphi_{16})$ – вектор електричних потенціалів незалежних вузлів схеми системи.

Матриця коефіцієнтів A визначається через параметри структурних елементів АСГ, а вектор вільних членів B – через параметри структурних елементів та струми електричних контурів структурних елементів АСГ.

Для забезпечення можливості моделювання динамічних режимів, необхідно записати ще одну систему диференціальних рівнянь, невідомими у якій є частота заповнення вентилів комутатора, кут повороту за частотою заповнення та механічна частота обертання ротора генератора. Ця система рівнянь має такий вигляд:

$$\frac{df_z}{dt} = -\frac{p_0^{(1)} + p_0^{(2)}}{2p_0} f_G \cdot \frac{dS}{dt}; \quad \frac{d\gamma_z}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot f_z; \quad \frac{d\omega_G}{dt} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot f_G}{p_0} \frac{dS}{dt},$$

де $f_z, \gamma_z, f_G, \omega_G, p_0^{(1)}, p_0^{(2)}, p_0, S, t$ – частота заповнення (частота напруги на вході комутатора), кут тиристорів за частотою заповнення, частота напруги генератора, частота обертання ротора генератора, кількість пар полюсів АМ1, АМ2 та генератора відповідно, ковзання генератора та час.

Вхідними даними для розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів є: параметри електричних машин та параметри вентилів, функціональна залежність ковзання від часу $S=S(t)$, а також початкові умови, що складаються з вектора інтегрованих змінних V та масиву стану вентилів IT . Вектор інтегрованих змінних V має таку структуру:

$$V = (i_{FS}^{(1)}, i_{FS}^{(2)}, i_{FR}, \gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \omega_F, i_T, i_{GS}, i_{GR}, \gamma_G, \omega_G, \int u_G^v dt, f_z, \gamma_z, t)$$

де ω_F, ω_G – механічна частота обертання роторів модулятора та генератора; $\gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \gamma_G$ – електричний кут повороту роторів АМ1, АМ2 та АСГ; i_T – вектор розмірністю 18 струмів тиристорних віток БТПЧ, u_G^v – модуль зображуючого вектора напруги статора генератора, t – час інтегрування.

Зміст решти величин вектора V описано вище.

Масив стану вентилів має розмірність 18, а числові значення його елементів мають значення нуль для запертого стану і одиницю для стану провідності.

Алгоритм розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів є таким:

- На підставі вхідних даних та параметрів структурних елементів АСГ для відповідного часу та стану вентилів формується система рівнянь електричної рівноваги (11), яка розв'язується відносно вектора потенціалів незалежних вузлів φ .

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

- Одним із явних методів числового інтегрування системи диференціальних рівнянь визначаються нові значення вектора інтегрованих змінних V для визначеного кроку інтегрування Δt .

- Цей процес відбувається у межах заданого вхідними даними кінцевого значення часу інтегрування.

Крім величин, що входять у вектор інтегрованих змінних V , визначаються спади електричних напруг на всіх тиристорах та напруги між незалежними вузлами схеми у довільній комбінації, модулі зображуючих векторів струмів і напруг, а також гармонічний склад отриманих величин.

Для ілюстрації дієздатності математичної моделі і відповідного програмного комплексу наводимо результати розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів, що відбуваються у АСГ потужністю 100 кВт при його роботі без навантаження. Розрахунки проведені для схеми з комбінованим потенціальним розділенням вузлів ротора модулятора ($K_F=1$). Працює система автоматичного стабілізування напруги.

Оскільки робота автономних систем характерна постійною зміною швидкості обертання рушія, то для демонстрування працездатності математичної моделі і програми за таких умов для розрахунку процесів вибираємо такий динамічний режим, у якому відбувається зміна ковзання у межах, що охоплює додатну і від'ємні області ковзання з переходом через нуль. Графік ковзання передбачає наявність п'яти етапів за часовою координатою. На початковій стадії АГС працює з постійним ковзанням $S=0,02$. Друга стадія динамічного процесу характеризується зміною ковзання від $S=0,02$ до $S=0,0$. На третій ділянці АСГ працює при постійному ковзанні $S=0,0$. На наступному проміжку ковзання змінюється від $S=0,0$ до $S=-0,02$. На останній ділянці генератор працює з постійним ковзанням $S=-0,02$.

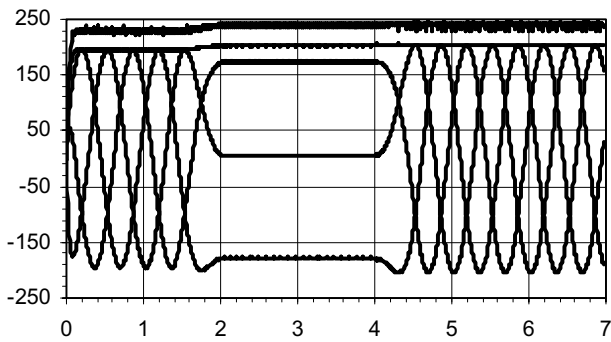
При аналізі процесів оперуємо поняттям модулів зображуючих векторів струмів і напруг, оскільки саме ці величин є виразним інтегральним показником основних фізичних величин. Модулі зображуючих векторів струмів і напруг відображають значення амплітуди цих величин.

Процеси розраховані з нульових початкових умов. Результати розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів АСГ для цього режиму відображені на рис. 2, 3.

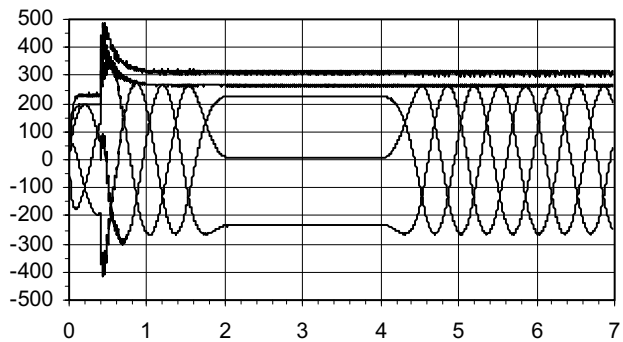
На рис. 2 зображені розрахункові осцилограми струмів та напруг АГ при його роботі без стабілізування напруги, а на рис. 3 зображені ці самі розрахункові осцилограми при роботі системи автоматичного стабілізування напруги.

На рис. 2, а зображено розрахункові осцилограми $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ миттєвих значень фазних струмів ротора та u_{GS}^v, i_{GR}^v модулів зображуючих векторів напруги статора та струму ротора генератора відповідно. Значення струмів вимірюються у Амперах, напруги у Вольт, а абсцисою є час інтегрування t , заданий у секундах.

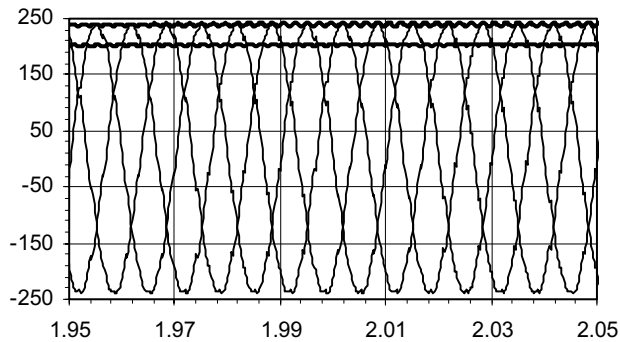
Характерним для кривих струмів ротора є те, що їх частота дорівнює частоті ковзання. І для ковзання $S=0,02$ та $S=-0,02$ частота модуляції цих струмів становить 1 Герц, що спостерігаємо з рисунків на першій та останній ділянках ($t=0 \div 1,5$ та $t=4,5 \div 7$ секунд) відповідно. При ковзанні $S=0,0$ комутатор працює в режимі випрямлення, тому на ділянці часу в межах від 2 до 4 с струми ротора є постійними. На ділянках змінного ковзання частота модуляції напруг та струмів розщеплених віток ротора генератора динамічно змінюється відповідно до закону зміни ковзання.



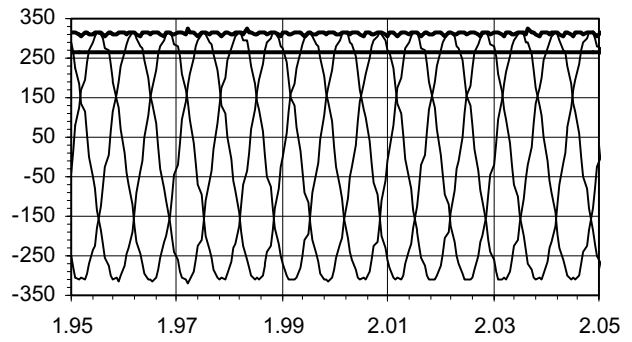
а) $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – фазні струми ротора генератора;
 u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів
 напруги статора та струму ротора генератора
 відповідно



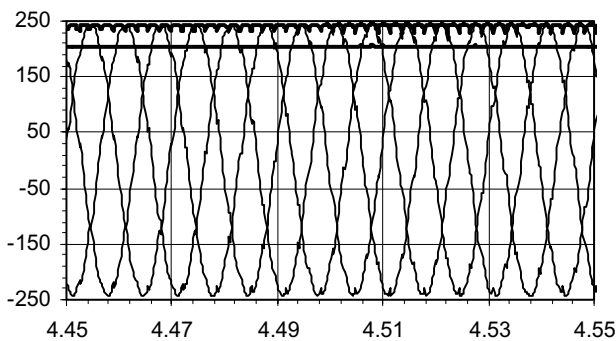
а) $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$ – фазні струми ротора ; u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів напруги статора та струму ротора генератора відповідно



б) $\phi_{14}, \phi_{15}, \phi_{16}$ – миттєві значення фазних напруг;
 u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів
 напруги статора та струму ротора генератора
 відповідно у околі точки стабілізування ковзання на
 значенні $S=0$ (для $t=2$ с)

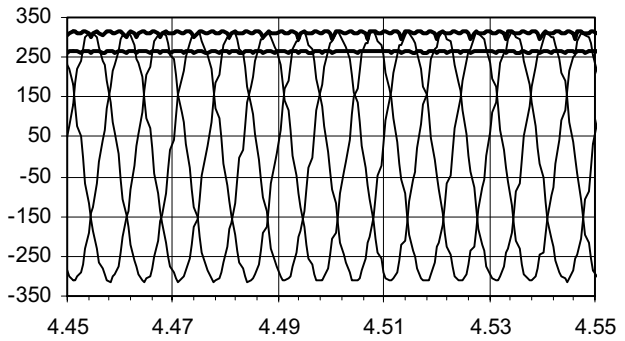


б) $\phi_{14}, \phi_{15}, \phi_{16}$ – миттєві значення фазних напруг;
 u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів
 напруги статора та струму ротора генератора
 відповідно у околі точки стабілізування ковзання
 на значенні $S=0$ (для $t=2$ с)



в) $\phi_{14}, \phi_{15}, \phi_{16}$ – миттєві значення фазних напруг;
 u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів
 напруги статора та струму ротора генератора
 відповідно у околі точки стабілізування ковзання на
 значенні $S=-0,02$ ($t=4,5$ с)

Рис. 2. Розрахункові осцилограми струмів та напруг АСГ при його роботі без стабілізування напруги



в) $\phi_{14}, \phi_{15}, \phi_{16}$ – миттєві значення фазних напруг;
 u_{GS}^v, i_{GR}^v – модулі зображуваних векторів
 напруги статора та струму ротора генератора
 відповідно у околі точки стабілізування ковзання
 на значенні $S=-0,02$ ($t=4,5$ с)

Рис. 3. Розрахункові осцилограми струмів та напруг АСГ при його роботі з регулятором напруги

Одним з найважливіших показників роботи генератора з БМЗ є частота генерованої ним напруги. Тому характер кривих миттєвих значень напруг становить особливий інтерес. На рис. 2, б зображено розрахункові осцилограми миттєвих значень фазних напруг (потенціалів $\varphi_{14}, \varphi_{15}, \varphi_{16}$) та u_{GS}^V, i_{GR}^V – модулів зображуючих векторів напруги статора та струму ротора генератора відповідно. Часовий проміжок охоплює частини двох діляниць: на першій з яких ковзання S змінюється від $S = 0,02$ до $S = 0,0$, а на другій – ковзання S має сталі значення ($S = 0$). На рис. 2, в зображено ці ж самі розрахункові величини, що і на рис 2б, але для іншого часового проміжку, коли ковзання S спочатку змінюється від $S = 0,0$ до $S = -0,02$, а далі має сталі значення ($S = -0,02$). Як бачимо з рис. 2, б, в, закон зміни ковзання не впливає на частоту напруги, яка є стабільною і дорівнює 50 Герц.

На рис. 3 відображені ці самі величини, що і на рис. 2, але для випадку функціонування системи автоматичного стабілізування напруги генератора. Тут використано пропорційно-інтегральний регулятор. На початку роботи генератор працює без САК. Вмикається САК у момент часу $t = 0,2$ с. Як видно з рисунку 3, САК підтримує задане значення напруги генератора, що становить 311 Вольт, а зміна ковзання не має жодного впливу як на частоту фазної напруги, так і на її інші параметри.

Кількісні та якісні показники електромагнітних величин визначаються параметрами структурних елементів системи, параметрами системи керування комутатором та САК. Тут більшою мірою зроблено акценти на принципових моментах функціонування АСГ з БМЗ у динамічних режимах роботи, а дослідження у кількісному відношенні є предметом окремих досліджень.

Висновки. 1. Запропонована математична модель АСГ з БМЗ на базі трифазно-трифазного БТПЧ у доповнення своїх попередніх аналогів дозволяє моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси, спричинені зміною швидкості обертання рушія.

2. Розрахункові осцилограми миттєвих значень фазних напруг підтверджують, що генератор забезпечує постійну частоту у динамічних режимах роботи при довільному законі зміни ковзання, що, у свою чергу, дає підстави стверджувати про працездатність систем генерування електроенергії даного типу.

Характер кривих струмів ротора та напруги статора є очікуваним з погляду принципу функціонування даного типу систем генерування та свідчить про адекватність математичної моделі.

Ця математична модель підсумовує важливий етап роботи з розробки математичних моделей та відповідного програмного забезпечення генераторів з безконтактними модульованими збуджувачами. Наявність таких математичних моделей дозволить виконувати повноцінні і всесторонні дослідження систем генерування з БМЗ.

1. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты // Тр. I Междунар. (III Всероссийской) конф. по электромехатронике. – СПб., 1997. – С. 182–192. 2. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи “Асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів” // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка. – К., 2000. – С. 153–163. 3. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем // Технічна електродинаміка. (Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність). –

2002. – Ч. 2. – С. 95–102. 4. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель електромеханічної системи “Асинхронний генератор з модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів” // *Технічна електродинаміка*. – К., 1998. – Спец. вип. 2, т. 2, – С. 66–71. 5. Василів К.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем // *Технічна електродинаміка*. – 2002. – № 6. – С. 31–37. 6. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов, 1986. – 164 с. 7. Василів К.М. Метод квазікомбінованих схем і вузлових уточнень струмів для моделювання статичних перетворювача частоти // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 1999. – № 372. – С. 18–28. 8. Дижур Д.И. Метод моделирования на ЦВМ вентильных преобразовательных схем // *Изв. НИИПТ*. Сб. 16. – С. 46–53.

УДК 621.316.11:621.67

П.Ф. Гоголюк, В.Г. Лисяк, В.С. Костишин*

Національний університет “Львівська політехніка”,

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ГРУПИ АГРЕГАТИВ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН – ВІДЦЕНТРОВА ПОМПА – З ПОСЛІДОВНИМ СПОЛУЧЕННЯМ ГІДРОТРАКТІВ ПОМП

© Гоголюк П. Ф., Лисяк В.Г., Костишин В.С., 2003

На підставі електрогідравлічної аналогії вперше створено математичну модель аналізу усталених режимів групи агрегатів із насиченими асинхронними двигунами та відцентровими помпами з послідовно сполученими гідротрактами. Запропоновано ефективний метод аналізу усталених режимів таких електроприймачів, як елементів вузла навантаження електропостачальної системи з урахуванням статичної напірної характеристики гідравлічної мережі.

The mathematical model intended for analysis of steady-state regimes in group of electric machines with saturated asynchronous motors, centrifugal pumps and hydrosections connected in series is created on the basis of electrohydraulic analogy. An effective method for steady-state regimes analysis of such electric receiving apparatus as elements of power distribution system load center is offered for the first time. Static characteristics of hydraulic network are taken into consideration.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розроблення прикладного математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем проектування електропостачальних систем (ЕПС) відсутні ефективні математичні моделі електроприймачів, які складаються з нерозривно пов'язаних між собою пристроїв різної фізичної природи. Це не дозволяє здійснювати комплексний аналіз режимів і процесів підсистем інженерного забезпечення промислових і цивільних об'єктів з урахуванням їх нелінійних характеристик і взаємного зв'язку.