

## УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА НУЛЬОВОЮ СХЕМОЮ

*Запропонована математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем, яка дає змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси з врахуванням функціонування рушія ротора генератора, а також взаємного впливу структурних елементів системи та функціонування систем автоматичного керування швидкості ротора генератора та амплітуди фазної напруги або струму статора генератора. Наведено результати моделювання процесів під час робочого циклу системи, який охоплює розгін генератора та вмикання і відмикання споживачів.*

*Предложена математическая модель автономной электроэнергетической системы на базе асинхронизированного генератора с бесконтактным каскадным модулированным возбудителем, которая дает возможность моделировать динамические электромагнитные и электромеханические процессы с учетом функционирования движителя ротора генератора, а также взаимного влияния структурных элементов системы и функционирования системы автоматического управления скоростью ротора генератора и амплитуды фазного напряжения или фазного тока статора генератора. Приведены результаты моделирования процессов во время рабочего цикла системы, охватывающего разгон генератора и включение и отключение потребителей.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Потужності автономних електроенергетичних систем (АЕЕС) становлять вагомую частку глобальної системи генерування та споживання електричної енергії, оскільки їх використання достатньо широко практикується майже у всіх галузях народного господарства.

Автономним електроенергетичним системам з погляду умов експлуатування та принципу функціонування притаманна низка специфічних особливостей, до основних з яких належать: робота генератора у режимі граничних навантажень, що робить актуальною проблемою надійності функціонування генератора, а також істотне коливання швидкості обертання рушія, що спричинює 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 АЕЕС асинхронізованих генераторів (АСГ). Впровадження АСГ стало позитивною тенденцією у розвитку електроенергетики загалом та автономної електроенергетики зокрема. Ідея АСГ перебуває у стані постійного еволюційного розвитку. На сьогодні один із перспективних варіантів створення АСГ вбачається у формуванні системи АСГ на базі безконтактних каскадних модульованих збуджувачів (БКМЗ) [5]. 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

Автор протягом останніх років виконав значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей автономних електроенергетичних систем на базі генераторів з БКМЗ, а також разом з науковцями НТУУ "КПІ" виконує роботу з дослідження значаєних систем, зокрема на комп'ютері методом математичного моделювання. Так, у [2] розроблено математичну модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним БКМЗ. У [1] розроблено математичну модель аналогічної автономної електроенергетичної системи на базі

асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним БКМЗ. Ці математичні моделі АЕЕС на базі БКМЗ дають змогу виконувати всебічні дослідження стосовно вивчення закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються у 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. 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 відбувалися у АЕЕС на базі АСГ з трифазно-трифазними [4] та двофазно-трифазними [3] БКМЗ.

### ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математичні моделі АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ [3], [4] істотно розширили діапазон можливостей стосовно аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів. Але практика дослідження показує, що для повноцінного аналізу процесів, які відбуваються у АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ як таких, необхідно моделювати процеси не лише у частині силового електричного кола, але й у структурному складникові, який стосується рушія. Потреба саме у таких математичних моделях проявляється при дослідженні АЕЕС з приводом від двигунів внутрішнього згорання.

Враховуючи те, що АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ та приводом від двигунів внутрішнього згорання належать до важливого сектора систем генерування такого класу, то вивчення поведінки систем саме з врахуванням рушія є безумовно необхідною для розвитку теорії та практики задачею, а розробка відповідних математичних моделей АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ та ретельне вивчення динамічних процесів, які відбуваються у таких системах, є актуальною науковою проблемою.

Отже, метою статті є розробка математичної моделі АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ з врахуванням наявності рушія ротора генератора для дослідження на комп'ютері динамічних електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються у цій системі.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Об'єктом дослідження є АЕЕС на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ, комутатором у якому слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти за нульовою схемою. Схема силового електричного кола такої АЕЕС зображена на рис. 1. Структурними елементами АЕЕС слугують: трифазно-трифазний модулятор, який складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розділені на три гілки; джерела живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, обмотки ротора якої з'єднані у зірку. До системи також входять споживачі: три асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3; активно-індуктивне навантаження Н, фільтр Ф, яким слугує батарея конденсаторів. Передбачена можливість роботи АСГ паралельно з трифазною електричною мережею М.

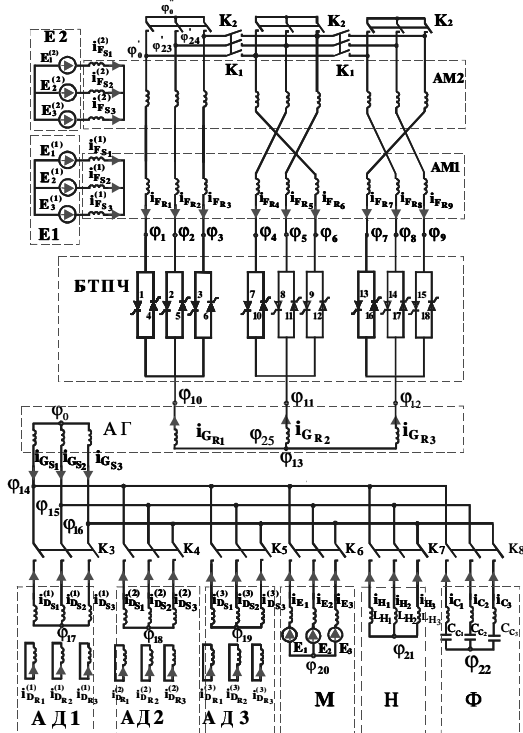


Рис. 1. Схема силового електричного кола АЕЕС

Окрім описаних вище ідентифікаторів структурних елементів АЕЕС, на схемі рис. 1 прийняті відповідні позначення електричних величин та інших компонентів схеми. Літерами  $\varphi$ ,  $I$ ,  $E$ ,  $L$ ,  $C$  позначено: потенціали, струми, електрорушійні сили, індуктивності та ємності, а літерою  $K$  – ключі схеми. Літерами  $F$ ,  $G$ ,  $D$ ,  $M$ ,  $H$ ,  $S$  у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до модулятора, генератора, асинхронних двигунів, електричної мережі з боку статора генератора, активно-індуктивного навантаження та фільтра. На схемі та у подальших викладах літерами  $S$ ,  $R$  у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами у нижніх індексах позначено номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 у нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. Цифрами у 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. Кількість штрихів у верхньому індексі відпові-

дає номеру варіанта з'єднань фазних гілок обмоток ротора АМ2.

У схемі модулятора передбачено два 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'являється три вузли з потенціалами:  $\varphi'_0$ ,  $\varphi'_{23}$ ,  $\varphi'_{24}$ . У другому варіанті ( $K_F=2$ ) передбачає з'єднання всіх фазних гілок обмоток ротора АМ2 у один спільний вузол з нульовим потенціалом  $\varphi''_0=0$ , тобто ключі  $K_1$  та  $K_2$  замкнені. Решта ключі  $K_3 \div K_8$  призначені для вмикання та відмикання споживачів. При цьому ключами  $K_3 \div K_5$  вмикаються та відмикаються три асинхронні двигуни АД1–АД3 відповідно, а вимикачами  $K_6 \div K_8$  – решта споживачі: електрична мережа, статичне навантаження та фільтр відповідно.

Математичною моделлю АЕЕС слугує 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 записані на підставі законів Кірхгофа та згідно з методом вузлових потенціалів [6]. Рівняння для електричних машин записані з врахуванням всіх наявних електромагнітних зв'язків між контурами кожної з машин. Рівняння електричної рівноваги АЕЕС значною мірою збігаються з аналогічними рівняннями, описаними у [2] та [4].

Повна система рівнянь електричної рівноваги АЕЕС у базисі електричних потенціалів незалежних вузлів для схеми силового електричного кола АЕЕС у матричній формі має такий вигляд:

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

де  $A$  – матриця коефіцієнтів,  $B$  – вектор вільних членів,  $\varphi = (\varphi_1 \div \varphi_{22})$  – вектор електричних потенціалів незалежних вузлів схеми силового електричного кола системи.

Більш докладно описувати систему рівнянь електричної рівноваги, а також інші системи рівнянь, які входять у математичну модель АЕЕС за винятком рівняння механічної рівноваги для генератора нема потреби, оскільки вони описані у публікаціях [2] та [4]. Тому зараз перейдемо безпосередньо до опису частини математичної моделі, яка стосується механічного рушія ротора генератора включно з САК швидкості обертання ротора генератора.

Отже рушій ротора генератора представимо джерелом механічного моменту, крутний механічний момент якого прикладається до вала ротора генератора. Тому механічну рівновагу ротора генератора опишемо диференціальним рівнянням, яке має такий вигляд:

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

де  $J$  – сумарний момент інерції обертових махових мас, розмішених на валі генератора (маса ротора генератора, маси роторів асинхронних машин модулятора та маса 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 слугує  $p\omega_G = \frac{d\omega_G}{dt}$  – похідна за часом  $t$  кутової швидкості обертання вала генератора. Момент інерції оберткових 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  $M_F$ . Запишемо формули для визначення електромагнітного моменту генератора. На підставі [6] вона має такий вигляд:

$$M_G = \frac{3}{2} \cdot P_{G_0} \cdot \frac{L_{G_m}}{K_{G_i}} \cdot (T_{G_X} \cdot T_{G_{Y_R}} - T_{G_Y} \cdot T_{G_{X_R}}), \quad (3)$$

де  $P_{G_0}, L_{G_m}, K_{G_i}$  – кількість пар полюсів, робоча індуктивність та коефіцієнт трансформації АСГ;

$$T_{G_X} = \frac{2}{3} \cdot \left( i_{G_{S_1}} - \frac{i_{G_{S_2}}}{2} - \frac{i_{G_{S_3}}}{2} \right); \quad T_{G_Y} = \frac{i_{G_{S_2}} - i_{G_{S_3}}}{\sqrt{3}};$$

$$T_{G_{X_R}} = \frac{2}{3} \times$$

$$\times [i_{G_{R_1}} \cos(\gamma_G) + i_{G_{R_2}} \cos(\gamma_G - \rho) + i_{G_{R_3}} \cos(\gamma_G + \rho)]$$

$$T_{G_{Y_R}} = \frac{2}{3} [i_{G_{R_1}} \sin(\gamma_G) + i_{G_{R_2}} \sin(\gamma_G - \rho) + i_{G_{R_3}} \sin(\gamma_G + \rho)]$$

а  $i_{G_{S_1}}, i_{G_{S_2}}, i_{G_{S_3}}, i_{G_{R_1}}, i_{G_{R_2}}, i_{G_{R_3}}, \gamma_G$  – фазні струми статора, ротора та електричний кут повороту ротора генератора;  $\rho = \frac{2}{3} \cdot \pi$  – електричний кут зсуву між фазами статора і між фазами ротора генератора.

Аналогічно записується формула для визначення сумарного електромагнітного моменту машин модулятора АМ1 та АМ2, яка має такий вигляд:

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

де  $M_F^{(1)} = M_{F_1}^{(1)} + M_{F_2}^{(1)} + M_{F_3}^{(1)}; M_F^{(2)} = M_{F_1}^{(2)} + M_{F_2}^{(2)} + M_{F_3}^{(2)}$  (6) – електромагнітні моменти першої та другої машин модулятора.

З рівняння (6) видно, що електромагнітні моменти кожної з двох машин АМ1 та АМ2 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 внаслідок 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 [6], як і для генератора, а самі вони відносно громіздкі, то наводити їх тут не доцільно.

Перейдемо до розгляду САК, призначення якої полягає у стабілізованні швидкості обертання ротора генератора. Вище йшлося про те, що у АЕЕС функціонує САК стабілізування швидкості обертання ротора генератора, завдання якої полягає у підтриманні зада-

ного значення швидкості обертання вала ротора генератора шляхом регулювання величини крутного механічного моменту. Структурна схема САК швидкості ротора АСГ зображена на рис. 2, на якому  $\omega_{G_3}$ ,  $\omega_G$  – задана та реальна швидкості ротора генератора відповідно;

$$\Delta\omega_G = \omega_{G_3} - \omega_G \quad (7)$$

– відхилення швидкості ротора АСГ від заданого її значення.

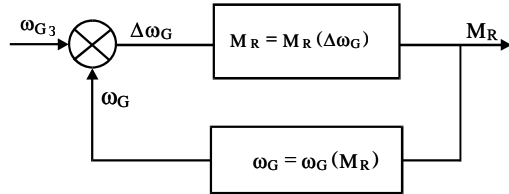


Рис. 2. Структурна схема САК швидкості ротора генератора

Система автоматичного стабілізування швидкості обертання ротора генератора зrealізована пропорційно-інтегральним регулятором. Виходячи з цього та рис. 2, механічний крутний момент визначається за такою формулою:

$$M_R = K_p^\omega (\omega_{G_3} - \omega_G) + K_i^\omega \int (\omega_{G_3} - \omega_G) dt + M_0, \quad (8)$$

де  $K_p^\omega, K_i^\omega$  – коефіцієнти пропорційного та інтегрального регуляторів швидкості обертання ротора АСГ;  $M_0$  – початкове значення крутного механічного моменту.

Стосовно опису математичної моделі рушія та САК швидкості обертання ротора генератора зазначимо, що задане значення швидкості  $\omega_{G_3}$  фігурує у математичній моделі АЕЕС як функція часу, яка задається у вигляді таблиці. Таким чином, математична модель дає змогу моделювати процеси, які відбуваються у піддослідній АЕЕС, виходячи з бажаної швидкості обертання (наприклад синхронної), що актуально для АЕЕС, генератори яких приводяться в рух двигунами внутрішнього згорання чи газовими турбінами, або задаючи довільний закон зміни функції  $\omega_{G_3}$  і у такий спосіб моделювати довільну апріорі очікувану функцію заданого значення швидкості, що відповідає умовам роботи вітрових електроенергетичних установок (ВЕЕУ).

На завершення опису математичної моделі піддослідної АЕЕС зазначимо, що ця математична модель циклоконвертора, на відміну від попередніх аналогів, розроблена, виходячи з вихідних допущень, які дають змогу врахувати фактор явища відновлення властивостей вентилів для їх запертого стану під час комутування. 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 АЕЕС завдяки двом останнім вдосконаленням (моделювання комутатора та уточнення струмів) відрізняється від своїх аналогів вищим рівнем адекватності стосовно моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів.

Вхідними даними для розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів слугують такі величини: параметри електричних машин (АСГ, АМ1, АМ2, АД1, АД2, АД3), параметри мережі, активно-індуктивного навантаження, фільтра та вентилів. Функціональна залежність від часу заданого значення

амплітуди напруги або струму статора генератора, функціональна залежність від часу заданого значення швидкості обертання ротора генератора, коефіцієнти регуляторів, масив стану вентилів ІТ розмірністю 18, а також початкові умови, які входять до вектора інтегрованих змінних  $V$ . Сам вектор інтегрованих змінних  $V$  має таку структуру:

$$V = (i_{F_S}^{(1)}, i_{F_S}^{(2)}, i_{F_R}, \gamma_F^{(1)}, \gamma_F^{(2)}, \omega_F, i_T, \\ i_{G_S}, i_{G_R}, \gamma_G, \omega_G, i_{D_S}^{(1)}, i_{D_R}^{(1)}, \gamma_D^{(1)}, \omega_D^{(1)}, \\ i_{D_S}^{(2)}, i_{D_R}^{(2)}, \gamma_D^{(2)}, \omega_D^{(2)}, i_{D_S}^{(3)}, i_{D_R}^{(3)}, \gamma_D^{(3)}, \omega_D^{(3)}, \\ i_M, i_H, i_C, u_C, \int (\omega_{G_3} - \omega_G) dt, \int (i_{G_3}^v - i_3) dt, \\ \int (u_{G_S}^v - u_3) dt, f_z, \gamma_z, t), \quad (5)$$

де  $i_{F_S}^{(1)} = (i_{F_{S1}}^{(1)}, i_{F_{S2}}^{(1)}, i_{F_{S3}}^{(1)})$ ,  $i_{F_S}^{(2)} = (i_{F_{S1}}^{(2)}, i_{F_{S2}}^{(2)}, i_{F_{S3}}^{(2)})$  – вектори струмів контурів статорів АМ1, АМ2;  $i_{F_R} = (i_{F_{R1}}, i_{F_{R2}}, i_{F_{R3}}, i_{F_{R4}}, i_{F_{R5}}, i_{F_{R6}}, i_{F_{R7}}, i_{F_{R8}}, i_{F_{R9}})$  – вектор струмів контурів ротора модулятора;  $i_T$  – вектор розмірністю 18 струмів тиристорних гілок БТПЧ;  $i_{G_S} = (i_{G_{S1}}, i_{G_{S2}}, i_{G_{S3}})$ ,  $i_{G_R} = (i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}})$  – вектори струмів контурів статора і ротора генератора;  $i_{D_S}^{(1)} = (i_{D_{S1}}^{(1)}, i_{D_{S2}}^{(1)}, i_{D_{S3}}^{(1)})$  – вектори струмів контурів статора АД1;  $i_{D_R}^{(1)} = (i_{D_{R1}}^{(1)}, i_{D_{R2}}^{(1)}, i_{D_{R3}}^{(1)})$  – вектори струмів контурів ротора АД1;  $i_{D_S}^{(2)}, i_{D_R}^{(2)}, i_{D_S}^{(3)}, i_{D_R}^{(3)}$  – вектори струмів АД2 та АД3 (аналогічно до АД1 див. схему рис. 1);  $i_M, i_H, i_C$  – 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;  $i_{G_S}^v, u_{G_S}^v$  – модулі зображувальних векторів струму та напруги статора генератора;  $t$  – час інтегрування.

Нааявні інформації цілком достатньо для викладу алгоритму розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються у підслідній АЕЕС.

#### Алгоритм розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів є таким:

- На підставі каталожних параметрів структурних елементів АЕЕС, початкових умов для відповідного моменту часу (вектора  $V$ ) та стану вентилів (масиву ІТ) формується система рівнянь електричної рівноваги (1), яка розв'язується стосовно вектора потенціалів незалежних вузлів  $\phi$ .
- Формується та розв'язується система рівнянь механічної рівноваги всіх машин, які входять до АЕЕС.
- 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 заданого кроку інтегрування  $\Delta t$ , а також новий стан вентилів комутатора (масив ІТ).

- Формується та розв'язується система рівнянь вузлових уточнень струмів.

- Цей процес триває у 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 АЕЕС на базі АСГ з БКМЗ.

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

Результати розрахунку основних координат АЕЕС у вигляді графіків зображено на рис. 3–12.

Моделювання процесів виконаємо для режиму, у якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АЕЕС 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 виконується почергове вимкнення раніше ввімкнених споживачів. Протягом цілого робочого циклу функціонують САК для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ.

Зазначимо, що саме такого режиму необхідно дотримуватися при пуску АСГ у реальній АЕЕС, щоби уникнути стрибків напруг у контурах машин модулятора та самого генератора.

На рис. 3 відображено розрахункові залежності заданого та реального ковзання АСГ від часу, а на рис. 4 зображена  $\omega_G$  кутова швидкість обертання ротора АСГ. Як видно з цього рисунку, синхронного значення швидкість досягає у околі моменту часу  $t=4$  с, а надалі (при вмиканні та вимиканні споживачів) система відповідним чином реагує на ці події. Реакція проявляється у коливанні швидкості обертання ротора та ковзання АСГ, що видно з рис. 3 та 4. На рис. 5 зображено розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів ротора АСГ. З цього рисунку видно, що САК підтримує стабільну амплітуду напруги, але спостерігаються коливання її значення у околі моментів часу вмикання та відмикання споживачів.

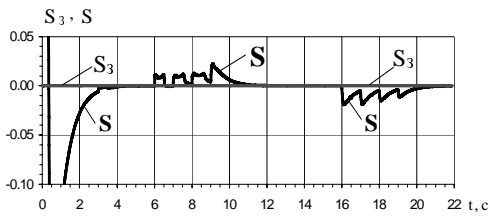


Рис. 3. Задане та реальне ковзання генератора

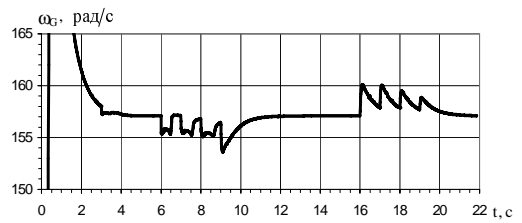


Рис. 4. Кутлова швидкість ротора генератора

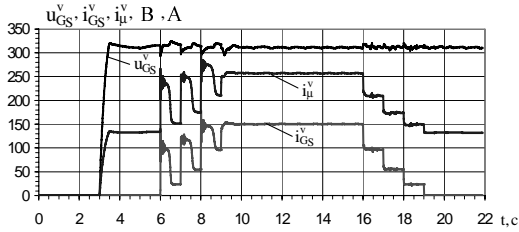


Рис. 5. Модулі зображувальних векторів фазних напруг і струмів статора та струмів ротора АСГ

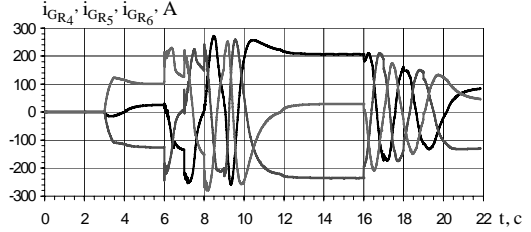


Рис. 6. Фазні струми ротора генератора

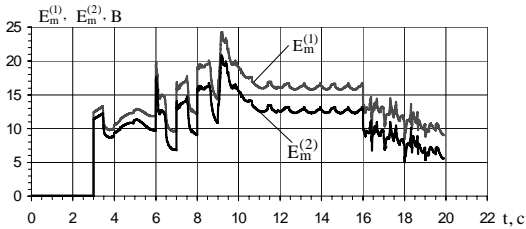


Рис. 7. Амплітуди електрорушійних сил джерел живлення статорів машин модулятора

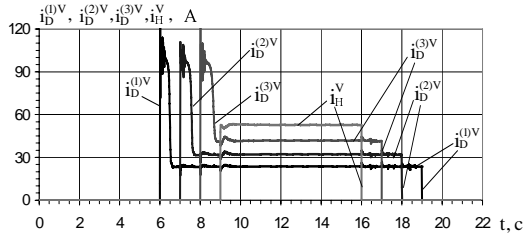


Рис. 8. Модулі зображувальних векторів струмів статорів асинхронних двигунів: АД1, АД2, АД3 та активно-індуктивного навантаження

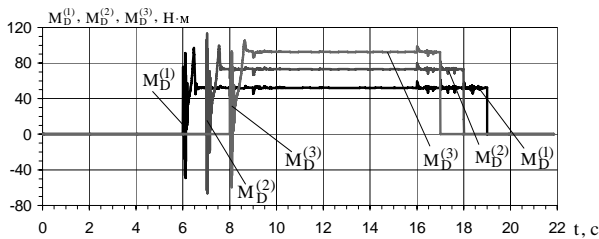


Рис. 9. Електромагнітні моменти асинхронних двигунів: АД1, АД2, АД3

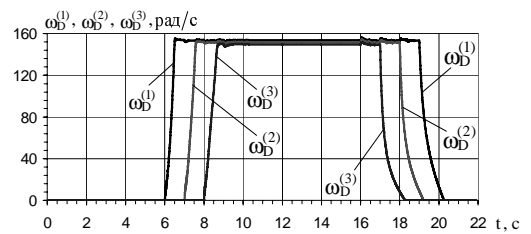


Рис. 10. Кутові швидкості обертання роторів асинхронних двигунів: АД1, АД2, АД3

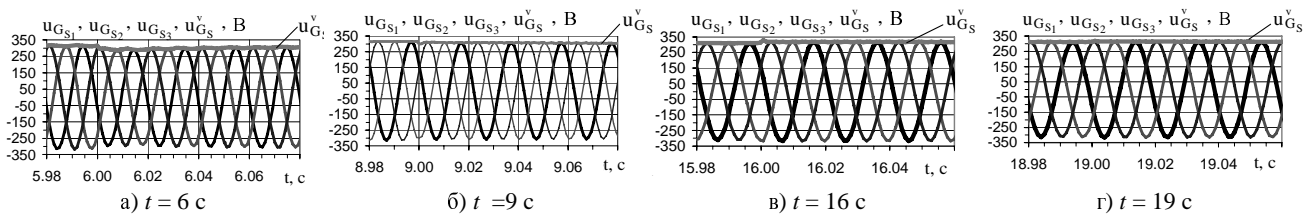


Рис. 11. Фазні напруги та модуль зображувального вектора фазних напруг статора генератора у околі моменту часу вмикання ( $t = 6, 9$  с) та відмикання ( $t = 16, 19$  с) споживачів відповідно

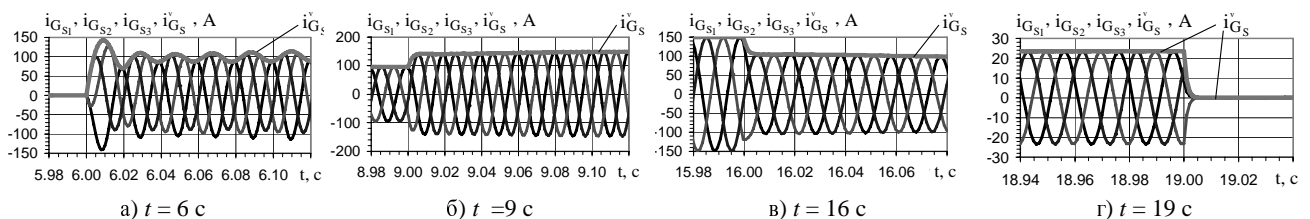


Рис. 12. Фазні струми та модуль зображувального вектора фазних струмів статора генератора у околі моменту часу вмикання ( $t = 6, 9$  с) та відмикання ( $t = 16, 19$  с) споживачів відповідно

На рис. 6 зображено розрахункові залежності фазних струмів ротора АСГ. Ці струми мають періодичний характер лише на проміжках часу, коли швидкість ротора АСГ відмінна від синхронної, а при синхронній швидкості вони є постійними, що відповідає фізиці процесів, які відбуваються у подібних системах.

На рис. 7 зображено розрахункові залежності амплітуд електрорушійних сил джерел живлення статорів машин модулятора. Характер цих кривих ілюструє реакцію САК на події вмикання споживачів.

На рис. 8 зображено розрахункові залежності модулів зображувальних векторів фазних струмів споживачів: АД1, АД2, АД3 та статичного навантаження. Характер кривих струмів двигунів виразно ілюструє перехідні процеси, які відбуваються під час пуску двигунів.

На рис. 9 та 10 відповідно зображено розрахункові залежності електромагнітних моментів та швидкостей обертання асинхронних двигунів.

Графіки основних координат на рис. 3-10 дають доволі повну уяву про перебіг процесів у піддослідній системі. Згідно з режимом робочого циклу АЕЕС споживачі: АД1, АД2, АД3 та статичне навантаження вмикаються у моменти часу  $t=6,7,8,9$  с відповідно, а відмикаються від АСГ у моменти часу  $t=16,17,18,19$  с, що виразно ілюструє характер кривих на цих рисунках. Для отримання повнішої інформації про перебіг електромагнітних та електромеханічних процесів, які відбуваються у піддослідній системі, з одного боку, та з'ясування рівня адекватності математичних моделей і можливостей відповідного програмного комплексу, з іншого боку, на наступних рисунках 11 та 12 зображено розрахункові осцилограми миттєвих значень фазних напруг  $u_{G_{R1}}, u_{G_{R2}}, u_{G_{R3}}$  та фазних струмів  $i_{G_{R1}}, i_{G_{R2}}, i_{G_{R3}}$  у околі моментів часу ввімкнення та відімкнення споживачів. З цих рисунків видно, що частота фазних струмів та напруг становить строго 50 Гц, не залежно від коливання швидкості ротора генератора, що вказує на високу ефективність функціонування АЕЕС стосовно якості генерованої електроенергії за критерієм стабільності частоти при змінній швидкості обертання ротора генератора.

#### ВИСНОВКИ

- Запропонована математична модель АЕЕС відрізняється від аналогів наявністю рушія ротора генератора, що істотно розширює можливості дослідження електромеханічних процесів АЕЕС з приводом від двигунів внутрішнього згорання та газових турбін.

- Математична модель циклоконвертора, який слугує комутатором, 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 врахування комутаційних перенапруг.

- Запропонована математична модель АЕЕС дає змогу виконувати всебічні дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів, з врахуванням рушія ротора генератора та системи автоматичного керування як у стаціонарних, так і у екстремальних ситуаціях, спричинених збоями у роботі САК та системи керування комутатором, а також пробоями вентилів циклоконвертора.

- Схема силового електричного кола модулятора з комбінованим потенціальним з'єднанням фазних гілок ротора АМ2 (коли  $K_F=1$ ) забезпечує стабільніше функціонування комутатора, а ніж схема зі з'єднанням фазних гілок ротора машини модулятора АМ2 у один спільний вузол (коли  $K_F=2$ ). Це, по-своєму, дає змогу отримати вищу якість генерованої електроенергії за критерієм стабільності амплітуди, а також за критерієм гармонічного складу напруги генератора.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василів К.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем // Техн. електродинаміка. – 2002. – №6. – С. 31-37.
2. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи "Асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів" // Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2000. – С.153-163.
3. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // Техн. 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 // Техн. електродинаміка.–2004.– № 5. – С. 50-55.
5. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты. Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по электромеханотронике. Санкт-Петербург, 1997. - С. 182-192.
6. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. - Львов: Выща школа, 1986.- 164 с.
7. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. - 208 с.

Надійшла 12.09.08

Василів Карл Миколайович, к.т.н., доц.

Національний лісотехнічний університет України (НЛТУУ) Україна, 79057, Львів, вул. Генерала Чупринки, 103, кафедра ОТ і МТП  
тел. (0322) 37-82-55, (0322) 22-64-03, E-mail: wask@ukr.net