

К.М. Василів, О.М. Галіновський, О.Г. Плахтина, Є.М.Дубчак
Український державний лісотехнічний університет,
кафедра ОТ і МТП
Національний технічний університет України “КПІ”,
кафедра електромеханіки
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КАСКАДНОГО МОДУЛЬОВАНОГО ЗБУДЖУВАЧА БЕЗКОНТАКТНОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА

© Василів К.М., Галіновський О.М., Плахтина О.Г., Дубчак Є.М., 2004

Наведена математична модель модульованого збуджувача безконтактного асинхронізованого генератора на базі двох електричних машин з однаковою кількістю полюсів і трифазно-трифазного безпосереднього тиристорного перетворювача частоти з природною комутацією, а також результати дослідження електромагнітних процесів.

Research of electromagnetic processes of the noncontact modulated exciter during the work of the generator of stable frequency under nominal static load was carried out with the help of a mathematical model. Objective laws of the influence of the modulated exciter scheme, sliding of the generator, and insertion according to current on electromagnetic process procedure in the noncontact modulated exciter were established.

Постановка проблеми. Однією з характерних особливостей сьогоденного стану електроенергетики є впровадження у практику використання асинхронізованих генераторів (АСГ) як у потужних енергосистемах, так і в автономній електроенергетиці: вітроенергетиці, дизель-генераторах, газотурбінних та турбодетандерних установках. Така тенденція спостерігається у всіх розвинених країнах. Для прикладу, Німеччина у вітроенергетиці щороку впроваджує понад 500 асинхронізованих генераторів потужністю 1500 кВт і вище.

Надзвичайно актуальною проблемою для автономних електроенергетичних систем є забезпечення стабільності частоти напруги при зміні швидкості обертання рушія, а також актуальною залишається проблема надійності функціонування системи взагалі. Крім стабільності частоти напруги та надійності роботи, однією з найважливіших вимог до систем збудження є забезпечення високої якості форми кривих струмів при змінних ковзаннях. Ця проблема ускладнюється характерною особливістю систем збудження АСГ, яка полягає у двозонності діапазону зміни швидкості обертання (вище і нижче від синхронної), що принципово відрізняє вимоги до систем збудження АСГ від вимог до систем збудження керованих електроприводів.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз науково-технічної літератури та принципів функціонування існуючих систем показує, що одією з найефективніших систем збудження, яка задовольняє зазначені вимоги, є система збудження на базі каскадних модульованих збуджувачів (КМЗ) [1, 2]. Характерною особливістю КМЗ 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. Такі системи збудження, враховуючи принцип їх функціонування, забезпечують стабільність частоти напруги (для автономних систем) та достатньо високий рівень надійності, що гарантується безконтактним виконанням.

Задачі досліджень. Каскадні модульовані системи збудження можна виконувати у двох схемних варіантах стосовно природи їх структурних елементів. Перший з них передбачає вико-

ристання сельсин як структурних елементів модулятора (для контактних систем збудження), а другий – асинхронних машин (для безконтактних систем збудження).

Безконтактні системи збудження за принципом функціонування розрізняються як системи з однаковою кількістю пар полюсів двох машин модулятора АМ1, АМ2 та системи збудження з неоднаковою кількістю пар полюсів машин модулятора АМ1 та АМ2 (див. рис.1.) У першому випадку кількість пар полюсів АМ1, АМ2 та АСГ має бути однаковою, тобто $P_0^{(1)} = P_0^{(2)} = P_H$, де $P_0^{(1)}$, $P_0^{(2)}$, P_H – кількість пар полюсів АМ1, АМ2 та навантаження (самого АСГ). При цьому машини модулятора мають живитися напругою частоти ковзання. У другому випадку кількість пар полюсів АМ1, АМ2 та АСГ має бути у таких співвідношеннях: $P_0^{(1)} \neq P_0^{(2)}$; $P_0^{(1)} - P_0^{(2)} = 2 \cdot P_H$, а живляться машини модулятора напругою потрібної частоти генератора.

У [3, 4] наведені математичні моделі та результати дослідження АСГ з каскадними модульованими збуджувачами з різною кількістю пар полюсів машин модулятора, а моделювання процесів з однаковою кількістю пар полюсів машин модулятора не висвітлено у літературі взагалі. Тому проблема моделювання та дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів АСГ з каскадними модульованими збуджувачами при однаковій кількості пар полюсів машин модулятора є актуальною науковою проблемою.

Метою статті є наведення математичної моделі та результатів дослідження модульованого збуджувача АСГ на базі двох електричних машин з фазним ротором при однаковій їх кількості пар полюсів.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є безконтактний каскадний модульований збуджувач асинхронізованого генератора з однаковою кількістю пар полюсів машин модулятора. Принципові схеми силових електричних кіл безконтактних каскадних модульованих систем збудження зображено на рис. 1, де АМ1, АМ2 – асинхронні машини, які є структурними елементами модулятора; Е1, Е2 – джерела живлення АМ1 та АМ2; БТПЧ – безпосередній тиристорний перетворювач частоти з природною комутацією; АГ – навантаження, яким є генератор з замкненими накоротко обмотками статора. Решта позначень на схемі рис. 1 є такими: буквами Е, φ , і – позначені електрорушійні сили джерел живлення, потенціали електричних вузлів та електричні струми віток. Верхніми індексами (1) та (2) позначено належність до машин АМ1, АМ2 та джерел живлення Е1, Е2. Нижніми індексами F, H позначено належність до модулятора та навантаження відповідно. Нижніми індексами S, R позначено належність до контурів статора і ротора асинхронних машин. У цій узагальненій схемі передбачено можливість зміни стану ключів $K_1 \div K_4$.

У схемі модулятора можливі три стани ключів: перший ($K_F = 1$) – ключі K_1 замкнені (комбіноване з'єднання розщеплених віток обмоток ротора АМ2), а ключі K_2 розімкнені; другий ($K_F = 2$) – ключі K_1 розімкнені, а ключі K_2 замкнені (окреме за групами фаз з'єднання розщеплених віток обмоток ротора АМ2); третій ($K_F = 3$) – ключі K_1 та K_2 замкнені (з'єднання розщеплених віток обмоток ротора АМ2 у один спільний вузол). Збоку навантаження (на виході комутатора) передбачено два стани ключів. Перший ($K_H = 1$) – ключі K_3 замкнені, а ключі K_4 розімкнені (розщеплені вітки фаз навантаження з'єднані у дві зірки); другий ($K_H = 2$) – ключі K_3 розімкнені, а ключі K_4 замкнені (мостова схема комутатора).

Математичною моделлю КМЗ є система диференціальних рівнянь електричної рівноваги силового електричного кола та система логічних рівнянь, що моделюють роботу системи керування тиристорним перетворювачем частоти.

Для зручності викладення математичної моделі виокремимо три складові частини під-дослідного об'єкта: електромашинний каскадний модулятор (ЕКМ), до складу якого включимо дві асинхронні машини АМ1, АМ2 та їх джерела живлення Е1 та Е2; БТПЧ, а також навантаження, яким є обмотка збудження АСГ.

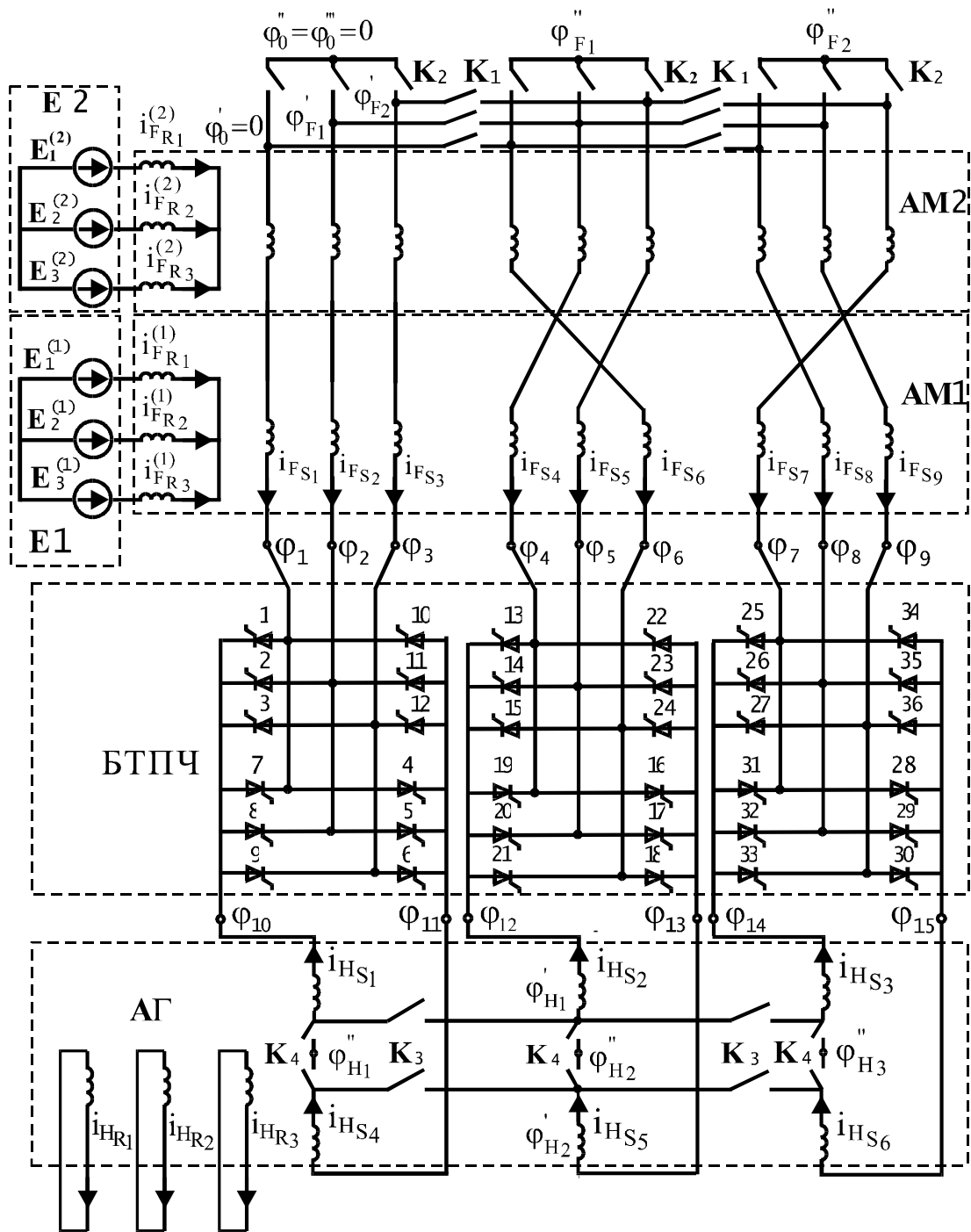


Рис. 1. Схема силового электричного кола КМЗ

Диференціальні рівняння електричної рівноваги каскадного модулятора. Електромагнітні процеси силового електричного кола ЕКМ опишемо системою диференціальних рівнянь електричної рівноваги, записаною за другим законом Кірхгофа для контурів статора і для контурів ротора, а також рівняннями, записаними згідно з першим законом Кірхгофа для похідних струмів електричних віток модулятора [5].

Рівняння електричної рівноваги для контурів статора має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 & (L_{FS,S}^{(1)} + L_{FS,S}^{(2)}) \cdot p i_{FS} + L_{FS,R}^{(1)} \cdot p i_{FR}^{(1)} + L_{FS,R}^{(2)} \cdot p i_{FR}^{(2)} + \\
 & + L_{FS,R}^{(1)} \cdot i_{FR}^{(1)} + L_{FS,R}^{(2)} \cdot i_{FR}^{(2)} + r_{FS} \cdot i_{FS} + \Phi_F - \Phi_{F0} = 0;
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$E^{(1)} + R_{FR}^{(1)} \cdot i_{FR}^{(1)} + L_{FR,S}^{(1)} \cdot pi_{FS} + L_{FR,R}^{(1)} \cdot pi_{FR}^{(1)} + L_{FR,S}^{(1)} \cdot i_{FS} = 0;$$

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

Рівняння, записані за першим законом Кірхгофа, для вузлів, що утворюються під час замикання ключів K_1 та K_2 мають вигляд

$$pi_{FS_2} + pi_{FS_4} + pi_{FS_9} = 0; \quad pi_{FS_3} + pi_{FS_5} + pi_{FS_7} = 0; \quad \text{для } K_F=1 \text{ та}$$

$$pi_{FS_4} + pi_{FS_5} + pi_{FS_6} = 0; \quad pi_{FS_7} + pi_{FS_8} + pi_{FS_9} = 0; \quad \text{для } K_F=2.$$

Вектори та матриці з рівнянь (1), (2) мають таку структуру та зміст:

$\Phi_F = (\Phi_{F_1}, \Phi_{F_2}, \Phi_{F_3}, \Phi_{F_4}, \Phi_{F_5}, \Phi_{F_6}, \Phi_{F_7}, \Phi_{F_8}, \Phi_{F_9})$ – вектор потенціалів на вході БТПЧ;

$\Phi_{F_0} = (0, \Phi'_{F_1}, \Phi'_{F_2}, \Phi'_{F_1}, \Phi'_{F_2}, 0, \Phi'_{F_2}, 0, \Phi'_{F_1})$ – вектор потенціалів вузлів обмотки статора АМ2 для

($K_F=1$); $\Phi_{F_0} = (0, 0, 0, \Phi''_{F_1}, \Phi''_{F_1}, \Phi''_{F_1}, \Phi''_{F_2}, \Phi''_{F_2}, \Phi''_{F_2})$; $\Phi_{F_0} = (0, \dots, 0)$ – цей же вектор для ($K_F = 2$) та

($K_F=3$); $\Phi'_{F_1}, \Phi'_{F_2}, \Phi''_{F_1}, \Phi''_{F_2}$ – електричні потенціали вузлів, що утворюються для стану ключів $K_F = 1$

та $K_F=2$; $i_{FS} = (i_{FS_1}, i_{FS_2}, i_{FS_3}, i_{FS_4}, i_{FS_5}, i_{FS_6}, i_{FS_7}, i_{FS_8}, i_{FS_9})$ – вектор струмів статора АМ1;

$i_{FR}^{(1)} = (i_{FR_1}^{(1)}, i_{FR_2}^{(1)}, i_{FR_3}^{(1)})$; $i_{FR}^{(2)} = (i_{FR_1}^{(2)}, i_{FR_2}^{(2)}, i_{FR_3}^{(2)})$ – вектори струмів роторів АМ1 та АМ2;

$R_{FS} = \text{diag}(R_{FS_1}^{(1)} + R_{FS_1}^{(2)}, R_{FS_2}^{(1)} + R_{FS_2}^{(2)}, R_{FS_3}^{(1)} + R_{FS_3}^{(2)}, R_{FS_4}^{(1)} + R_{FS_4}^{(2)}, R_{FS_5}^{(1)} + R_{FS_5}^{(2)}, R_{FS_6}^{(1)} + R_{FS_6}^{(2)}, R_{FS_7}^{(1)} + R_{FS_7}^{(2)}, R_{FS_8}^{(1)} + R_{FS_8}^{(2)}, R_{FS_9}^{(1)} + R_{FS_9}^{(2)})$ – діагональна матриця активних опорів контурів статора

модулятора з врахуванням з'єднання обмоток статорів АМ1 та АМ2; $L_{FS,S}^{(1)} = \begin{bmatrix} L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} \\ L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} \\ L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} & L_{S,S}^{(1)} \end{bmatrix}$ –

матриця власних індуктивностей контурів статора АМ1, де

$$L_{S,S}^{(1)} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_m^{(1)} + L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) \\ (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) & L_m^{(1)} + L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) \\ (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2) & L_m^{(1)} + L_{\sigma S}^{(1)} + L_{0S}^{(1)} / 2 \end{bmatrix},$$

у якій $L_m^{(1)}, L_{\sigma S}^{(1)}, L_{0S}^{(1)}$ – робоча індуктивність, індуктивність розсіювання та індуктивність нульової послідовності статора АМ1.

Матриця власних індуктивностей контурів статора АМ2 має таку структуру:

$$L_{FS,S}^{(2)} = \begin{bmatrix} L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} \\ L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} \\ L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} \\ L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} \\ L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} \\ L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} \\ L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,B}^{(2)} & L_{B,C}^{(2)} & L_{B,A}^{(2)} \\ L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,B}^{(2)} & L_{C,C}^{(2)} & L_{C,A}^{(2)} \\ L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,B}^{(2)} & L_{A,C}^{(2)} & L_{A,A}^{(2)} \end{bmatrix}.$$

Як і для матриці $L_{S,S}^{(1)}$ елементи матриці $L_{S,S}^{(2)}$ визначаються з матриці індуктивностей

$$L_{j,i}^{(2)} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_m^{(2)} + L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)} / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 \\ (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 & L_m^{(2)} + L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)} / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 \\ (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)}) / 2 & L_m^{(2)} + L_{\sigma S}^{(2)} + L_{0S}^{(2)} / 2 \end{bmatrix},$$

записаної для окремих розщеплених віток контурів статора АМ2, у якій $j = (A,B,C)$ та $i = (A,B,C)$ – індекси, що відповідають однойменним фазам розщеплених віток електричних контурів статора АМ2, а $L_m^{(2)}, L_{\sigma S}^{(2)}, L_{0S}^{(2)}$ – робоча індуктивність, індуктивність розсіювання та індуктивність нульової послідовності статора АМ2.

$$L_{HR,R}^{(1)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(K_i^{(1)})^2} \cdot \begin{bmatrix} L_m^{(1)} + L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)} / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 \\ (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 & L_m^{(1)} + L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)} / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 \\ (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 & (-L_m^{(1)} - L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)}) / 2 & L_m^{(1)} + L_{\sigma R}^{(1)} + L_{0R}^{(1)} / 2 \end{bmatrix},$$

$$L_{HR,R}^{(2)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(K_i^{(2)})^2} \cdot \begin{bmatrix} L_m^{(2)} + L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)} / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 \\ (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 & L_m^{(2)} + L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)} / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 \\ (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 & (-L_m^{(2)} - L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)}) / 2 & L_m^{(2)} + L_{\sigma R}^{(2)} + L_{0R}^{(2)} / 2 \end{bmatrix}$$

– матриці власних індуктивностей обмоток роторів АМ1 та АМ2.

Матриця індуктивностей між контурами статора і ротора для АМ1 та АМ2

$$L_{FS,R}^{(1)} = D_1 \begin{bmatrix} \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) \\ \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) \\ \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) & \cos(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(1)} + \rho) & \cos(\gamma^{(1)} - \rho) & \cos(\gamma^{(1)}) \end{bmatrix}; \quad L_{FS,R}^{(2)} = D_2 \begin{bmatrix} \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) \\ \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) \\ \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) & \cos(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \cos(\gamma^{(2)} + \rho) & \cos(\gamma^{(2)} - \rho) & \cos(\gamma^{(2)}) \end{bmatrix},$$

де $D_1 = 2 \cdot L_m^{(1)} / (3 \cdot K_i^{(1)})$, $D_2 = 2 \cdot L_m^{(2)} / (3 \cdot K_i^{(2)})$, а $K_i^{(1)}, K_i^{(2)}, \gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}$ – коефіцієнти

трансформації та кути повороту ротора АМ1 та АМ2; $\rho = 2 \cdot \pi / 3$.

Похідні матриць $L_{FS,R}^{(1)}$ та $L_{FS,R}^{(2)}$ за кутами повороту роторів $\gamma^{(1)}$ та $\gamma^{(2)}$

$$L_{FS,R}^{(1)} = D_1' \begin{bmatrix} \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) \\ \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) \\ \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) & \sin(\gamma^{(1)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(1)} + \rho) & \sin(\gamma^{(1)} - \rho) & \sin(\gamma^{(1)}) \end{bmatrix}; \quad L_{FS,R}^{(2)} = D_2' \begin{bmatrix} \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) \\ \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) \\ \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) & \sin(\gamma^{(2)} + \rho) \\ \sin(\gamma^{(2)} + \rho) & \sin(\gamma^{(2)} - \rho) & \sin(\gamma^{(2)}) \end{bmatrix}$$

де $D_1' = -2 \cdot L_m^{(1)} \cdot p_0^{(1)} \cdot \omega / (3 \cdot K_i^{(1)})$, $D_2' = -2 \cdot L_m^{(2)} \cdot p_0^{(2)} \cdot \omega / (3 \cdot K_i^{(2)})$, а $p_0^{(1)}$ та $p_0^{(2)}$ – кількість пар полюсів АМ1 та АМ2; ω – кутова частота обертання ротора генератора.

$E^{(1)} = E_m^{(1)} \cdot [\sin(\omega t), \sin(\omega t - \rho), \sin(\omega t + \rho)]$, $E^{(2)} = E_m^{(2)} \cdot [\sin(\omega t), \sin(\omega t + \rho), \sin(\omega t - \rho)]$ – вектори електрорушійних сил першого і другого джерел живлення, де $E_m^{(1)}$, $E_m^{(2)}$ їх амплітуди; t – час; $R_{FR}^{(1)} = \text{diag}(R_{FR1}^{(1)}, R_{FR2}^{(1)}, R_{FR3}^{(1)})$, $R_{FR}^{(2)} = \text{diag}(R_{FR1}^{(2)}, R_{FR2}^{(2)}, R_{FR3}^{(2)})$ – діагональні матриці активних опорів контурів роторів АМ1 та АМ2; $L_{FR,S}^{(1)}$, $L_{FR,S}^{(2)}$ – матриці взаємних індуктивностей між контурами ротора та статора для АМ1 та АМ2 (матриці, транспоновані відносно $L_{FS,R}^{(1)}$, $L_{FS,R}^{(2)}$).

Виключивши із систем (1), (2) вектори $pi_{FR}^{(1)}$, $pi_{FR}^{(2)}$ і потенціали вузлів, φ_{F1}' , φ_{F2}' для $K_F = 1$ або φ_{F1}'' , φ_{F2}'' $K_F = 2$, отримаємо остаточну систему рівнянь КМЗ

$$L_F \cdot pi_F + V_F + \Pi_F \cdot \varphi_F = 0, \quad (3)$$

у якій L_F – матриця коефіцієнтів; V_F – вектор вільних членів; Π_F – матриця перетворення потенціалів КМЗ.

Диференціальні рівняння електричної рівноваги тиристорного перетворювача частоти. Систему рівнянь для БТПЧ запишемо відповідно до методу вузлових потенціалів [5]

$$pi_F + G_{F,F} \cdot \varphi_F + G_{F,H} \cdot \varphi_H + c_F; \quad pi_H + G_{H,F} \cdot \varphi_F + G_{H,H} \cdot \varphi_H + c_H, \quad (4)$$

де

$$G_{F,F} = \text{diag}(g_1 + g_4 + g_7 + g_{10}, g_2 + g_5 + g_8 + g_{11}, g_3 + g_6 + g_9 + g_{12}, g_{13} + g_{16} + g_{19} + g_{22}, g_{14} + g_{17} + g_{20} + g_{23}, g_{15} + g_{18} + g_{21} + g_{24}, g_{25} + g_{28} + g_{31} + g_{34}, g_{26} + g_{29} + g_{32} + g_{35}, g_{27} + g_{30} + g_{33} + g_{36});$$

$$G_{F,H} = \text{diag} \begin{bmatrix} g_1 + g_7 & g_4 + g_{10} & g_{13} + g_{19} & g_{16} + g_{22} & g_{25} + g_{31} & g_{28} + g_{34} \\ g_2 + g_8 & g_5 + g_{11} & g_{14} + g_{20} & g_{17} + g_{23} & g_{26} + g_{32} & g_{29} + g_{35} \\ g_3 + g_9 & g_6 + g_{12} & g_{15} + g_{21} & g_{18} + g_{24} & g_{37} + g_{33} & g_{30} + g_{36} \end{bmatrix};$$

$$G_{H,F} \text{ – матриця, транспонована відносно } G_{H,H}; \quad G_{H,H} = \text{diag}(g_1 + g_2 + g_3 + g_7 + g_8 + g_9, g_4 + g_5 + g_6 + g_{10} + g_{11} + g_{12}, g_{13} + g_{14} + g_{15} + g_{19} + g_{20} + g_{21}, g_{16} + g_{17} + g_{18} + g_{22} + g_{23} + g_{24}, g_{25} + g_{26} + g_{27} + g_{31} + g_{32} + g_{33}, g_{28} + g_{29} + g_{30} + g_{34} + g_{35} + g_{36});$$

$$C_F = (-b_1 - b_4 + b_7 + b_{10}, -b_2 - b_5 + b_8 + b_{11}, -b_3 - b_6 + b_9 + b_{12}, -b_{13} - b_{16} + b_{19} + b_{22}, -b_{14} - b_{17} + b_{20} + b_{23}, -b_{15} - b_{18} + b_{21} + b_{24}, -b_{25} - b_{28} + b_{31} + b_{34}, -b_{26} - b_{29} + b_{34} + b_{35}, -b_{27} - b_{30} + b_{35} + b_{36});$$

$$C_H = (b_1 + b_2 + b_3 - b_7 - b_8 - b_9, b_4 + b_5 + b_6 - b_{10} - b_{11} - b_{12}, b_{13} + b_{14} + b_{15} - b_{19} - b_{20} - b_{21}, b_{16} + b_{17} + b_{18} - b_{22} - b_{23} - b_{24}, b_{25} + b_{26} + b_{27} - b_{31} - b_{32} - b_{33}, b_{28} + b_{29} + b_{30} - b_{34} - b_{35} - b_{36}).$$

У матрицях коефіцієнтів та векторах з рівнянь (4) $g_j = 1/L_j$; $b_j = r_j \cdot i_j \cdot g_j$, де r_j , i_j , L_j – активний опір, струм та індуктивність j -го тиристора ($j = 1, 2, \dots, 36$).

Диференціальні рівняння електричної рівноваги навантаження. Система рівнянь навантаження має аналогічний вигляд до системи рівнянь ЕКМ і складається з рівнянь статора і ротора, записаних за другим законом Кірхгофа для замкнених контурів та рівнянь, записаних за першим законом Кірхгофа для похідних струмів розщеплених віток обмоток з врахуванням стану ключів навантаження ($K_H = 1$ та $K_H = 2$).

Перша група рівнянь має такий вигляд:

$$\varphi_H - \varphi_{H0} + r_{HS} \cdot i_{HS} + L_{HS,S} \cdot pi_{HS} + L_{HS,R} \cdot pi_{HR} + L'_{HS,R} \cdot i_{HR} = 0. \quad (5)$$

$$R_{HR} \cdot i_{HR} + L_{HR,S} \cdot pi_{HS} + L_{HR,R} \cdot pi_{HR} + L'_{HR,S} \cdot i_{HS} = 0. \quad (6)$$

$$\text{Рівняння для вузлів при } K_H=1 \quad pi_{HS1} + pi_{HS2} + pi_{HS3} = 0; \quad pi_{HS4} + pi_{HS5} + pi_{HS6} = 0.$$

Рівняння для вузлів при $K_H=2$ $p_{i_{HS1}} - p_{i_{HS4}} = 0$; $p_{i_{HS2}} - p_{i_{HS5}} = 0$; $p_{i_{HS3}} - p_{i_{HS6}} = 0$.

Матриці коефіцієнтів та вектори з рівнянь (5), (6) мають таку структуру та зміст:

$\Phi_H = (\Phi_{H1}, \Phi_{H2}, \Phi_{H3}, \Phi_{H4}, \Phi_{H5}, \Phi_{H6})$; $\Phi_{H0} = (\Phi'_{H1}, \Phi'_{H1}, \Phi'_{H1}, \Phi'_{H2}, \Phi'_{H2}, \Phi'_{H2})$ для $K_H=1$;
 $\Phi_{H0} = (\Phi''_{H1}, \Phi''_{H2}, \Phi''_{H3}, \Phi''_{H1}, \Phi''_{H2}, \Phi''_{H3})$ для $K_H = 2$ – вектор потенціалів навантаження на виході обмотки статора для $K_H=1$ та $K_H=2$; Φ'_{H1}, Φ'_{H2} та $\Phi''_{H1}, \Phi''_{H2}, \Phi''_{H3}$ – електричні потенціали вузлів, що утворюються внаслідок замикання ключів K_3, K_4 ; $i_{HS} = (i_{HS1}, i_{HS2}, i_{HS3}, i_{HS4}, i_{HS5}, i_{HS6})$ – вектор струмів статора навантаження; $i_{HR} = (i_{HR1}, i_{HR2}, i_{HR3})$ – вектор струмів ротора навантаження; $R_{HS} = \text{diag}(R_{HS1}, R_{HS2}, R_{HS3}, R_{HS4}, R_{HS5}, R_{HS6})$ – діагональна матриця активних опорів контурів статора навантаження; $R_{HR} = \text{diag}(R_{HR1}, R_{HR2}, R_{HR3})$ – діагональна матриця активних опорів контурів ротора навантаження:

Матриця індуктивностей контурів статора навантаження має таку структуру:

$$L_{HS,S} = \begin{bmatrix} L_{S,S} & L_{S,S} \\ L_{S,S} & L_{S,S} \end{bmatrix},$$

де

$$L_{S,S} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma S} + L_{0S}/2 & (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 & (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 \\ (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 & L_m + L_{\sigma S} + L_{0S}/2 & (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 \\ (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 & (-L_m - L_{\sigma S} + L_{0S})/2 & L_m + L_{\sigma S} + L_{0S}/2 \end{bmatrix}$$

– матриця індуктивностей розщеплених обмоток контурів статора навантаження, у якій $L_m, L_{\sigma S}, L_{0S}$ – робоча індуктивність, індуктивність розсіювання статора та індуктивність нульової послідовності статора.

Решта матриць індуктивностей мають таку структуру і зміст:

$L_{HS,R} = \begin{bmatrix} L_{S,R} \\ L_{S,R} \end{bmatrix}$ – матриця індуктивності між контурами статора і ротора АСГ, де

$$L_{S,R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{L_m}{K_i} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_H) & \cos(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) & \cos(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) \\ \cos(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) & \cos(\gamma_H) & \cos(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) \\ \cos(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) & \cos(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) & \cos(\gamma_H) \end{bmatrix},$$

а K_i – коефіцієнт трансформації; γ_H – кут повороту ротора; $L_{HR,S}$ – матриця, транспонована відносно $L_{HS,R}$;

$$L_{HR,R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{K_i^2} \cdot \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma R} + L_{0R}/2 & (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 & (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 \\ (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 & L_m + L_{\sigma R} + L_{0R}/2 & (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 \\ (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 & (-L_m - L_{\sigma R} + L_{0R})/2 & L_m + L_{\sigma R} + L_{0R}/2 \end{bmatrix}$$

– матриця власних індуктивностей контурів ротора, де $L_{\sigma R}, L_{0R}$ – індуктивність розсіювання контурів ротора та індуктивність нульової послідовності ротора навантаження;

$L'_{HS,R} = \begin{bmatrix} L'_{S,R} \\ L'_{S,R} \end{bmatrix}$ – похідна матриці $L_{HS,R}$ за кутом повороту ротора навантаження, де

$$L'_{S,R} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{L_m \cdot \omega_H}{K_i} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\gamma_H) & \sin(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) & \sin(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) \\ \sin(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) & \sin(\gamma_H) & \sin(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) \\ \sin(\gamma_H + 2 \cdot \pi/3) & \sin(\gamma_H - 2 \cdot \pi/3) & \sin(\gamma_H) \end{bmatrix},$$

у якій ω_H – кутова частота обертання ротора навантаження; $L'_{HR,S}$ – матриця, транспонована відносно $L'_{HS,R}$.

Виключивши з (6) вектор похідних струмів ротора ri_{HR} та з (5) потенціали вузлів ϕ'_{01} , ϕ'_{02} для $K_H=1$ або ϕ''_{01} , ϕ''_{02} , ϕ''_{03} для $K_H=2$, отримаємо остаточну систему рівнянь навантаження

$$L_H \cdot ri_{HS} + B_H + \Pi_H \cdot \phi_H = 0, \quad (7)$$

де L_H – матриця коефіцієнтів; B_H – вектор правих частин; Π_H – матриця перетворення вектора потенціалів ϕ_H , структура якої визначається станом ключів навантаження.

Підставивши $ri_F = ri_{FS}$ та $ri_H = ri_{HS}$ з (4) у (3) та (7) відповідно отримаємо остаточну систему рівнянь електричної рівноваги КМЗ

$$A \cdot \phi + B = 0, \quad (8)$$

де – A матриця коефіцієнтів, ϕ – вектор невідомих потенціалів, B – вектор вільних членів мають таку структуру:

$$A = \begin{bmatrix} A_{F,F} & A_{F,H} \\ A_{H,F} & A_{H,H} \end{bmatrix}; \quad \phi = \begin{bmatrix} \phi_F \\ \phi_H \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} B_{FF} \\ B_{HH} \end{bmatrix},$$

а їх складові визначаються за формулами $A_{F,F} = \Pi_F + L_F G_{F,F}$; $A_{F,H} = L_F G_{F,H}$; $A_{H,F} = L_H \Pi_S G_{H,F}$; $A_{H,H} = L_H \Pi_S G_{H,H}$; $B_{FF} = B_F + L_F C_F$; $B_{HH} = B_H + L_H \Pi_H C_H$, де Π_S , Π_H – матриці, що описують топологію схеми електричних кіл.

Математична модель орієнтована на явні числові методи. Тут використано явний метод Рунге-Кутта другого порядку. Результатом розрахунку є електричні потенціали вузлів схеми, електричні напруги у довільній комбінації потенціалів та електричні струми всіх віток схеми.

Вхідні дані для розрахунку електромагнітних процесів поділимо на дві групи. До першої включимо каталожні параметри електричних машин (робочі індуктивності, індуктивності розсіювання, індуктивності нульової послідовності контурів статора і ротора, а також активні опори, коефіцієнти трансформації і число пар полюсів) та індуктивності і активні опори вентилів комутатора. До другої групи вхідних даних зарахуємо початкові умови – величини, що отримуються безпосереднім інтегруванням системи диференціальних рівнянь і з яких формується вектор інтегрованих змінних. Елементами цього вектора є струми електричних віток схеми, кути поворотів та кутові швидкості обертання електричних машин, а також час інтегрування. До другої групи вхідних даних також зарахуємо масив стану тиристорів, числові значення елементів якого дорівнюють 0 або 1 для запертого стану і стану провідності відповідно.

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів є таким:

1. На підставі вхідних даних формується система рівнянь електричної рівноваги (8).
2. Система рівнянь (8) розв'язується відносно вектора потенціалів ϕ .
3. Визначається вектор інтегрування (похідна вектора інтегрованих змінних).

4. На підставі вектора інтегрованих змінних та заданого кроку інтегрування за часом визначається нове значення інтегральних змінних, які слугують початковими умовами для наступного кроку інтегрування.

На підставі математичної моделі мовою програмування FORTRAN розроблено програмний комплекс, що дозволяє досліджувати на комп'ютері електромагнітні процеси, які відбуваються у КМЗ.

Нижче наведено приклад результатів розрахунку електромагнітних процесів КМЗ при таких вхідних параметрах машин модулятора та АСГ:

Вхідні параметри електричних машин модулятора

$$L_m^{(1)} = L_m^{(2)} = 0,024 \text{ Гн}; \quad L_{\sigma S}^{(1)} = L_{\sigma S}^{(2)} = L_{0S}^{(1)} = L_{0S}^{(2)} = 0,0007 \text{ Гн};$$

$$L_{\sigma R}^{(1)} = L_{\sigma R}^{(2)} = 0,006287 \text{ Гн}; \quad K_i^{(1)} = K_i^{(2)} = 0,33; \quad p_0^{(1)} = p_0^{(2)} = 2; \quad E_m^{(1)} = E_m^{(2)} = 100 \text{ В}.$$

Вхідні параметри вентилів БТПЧ для стану провідності та запертого стану відповідно

$$L_{Tb} = 0,0003183 \text{ Гн}; \quad L_{T3} = 100 \text{ Гн}; \quad R_{Tb} = 0,001 \text{ Ом}; \quad R_{T3} = 1000 \text{ Ом}.$$

Вхідні параметри навантаження

$$L_m = 0,054 \text{ Гн}; \quad L_{\sigma S} = L_{0S} = 0,00157 \text{ Гн}; \quad L_{\sigma R} = L_{0R} = 0,006287 \text{ Гн}; \quad K_{iH} = 0,5; \quad P_H = 2.$$

Вставка за струмом навантаження $h = 0.5$ Ампера, кут керування комутатором $\alpha_3 = 0^\circ$, ширина зони подачі імпульсів на відкривання тиристорів – 120° .

Для стану ключів $K_F = 1$ та $K_H = 1$ розрахункові осцилограми фазних струмів навантаження $i_{HS1}, i_{HS2}, i_{HS3}$ залежно від часу зображені на рис. 2, а розрахункові осцилограми струмів $i_{HS4}, i_{HS5}, i_{HS6}$ – на рис. 3. Сумарні струми розщеплених віток статора навантаження $i_{\mu 1} = i_{HS1} + i_{HS4}, i_{\mu 2} = i_{HS2} + i_{HS5}, i_{\mu 3} = i_{HS3} + i_{HS6}$ зображені на рис. 4. На рис. 5 зображені розрахункові осцилограми струмів $i_{HS1} = i_{HS4}, i_{HS2} = i_{HS5}, i_{HS3} = i_{HS6}$ для стану ключів $K_F = 1$ та $K_H = 2$.

Як видно з рис. 2–5, комбіноване потенціальне розділення розщеплених обмоток машин модулятора і навантаження забезпечує високу якість форми кривих струмів обмоток збудження генератора (рис. 4). При під'єднанні фазних обмоток навантаження на мостову схему БТПЧ спостерігається істотне спотворення форми кривих струмів навантаження (рис. 5) навіть за наявності комбінованого потенціального розділення обмоток КМЗ.

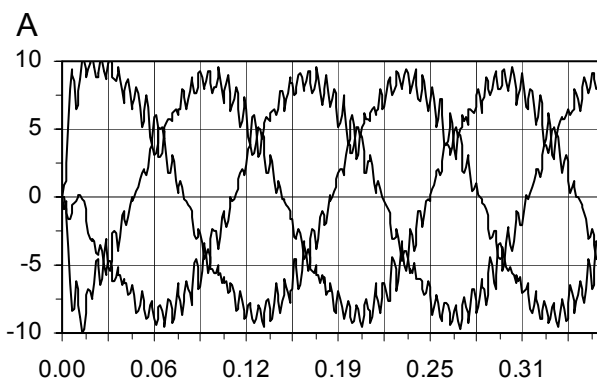


Рис. 2. $i_{HS1}, i_{HS2}, i_{HS3}$ – струми розщеплених віток навантаження для першої зірки

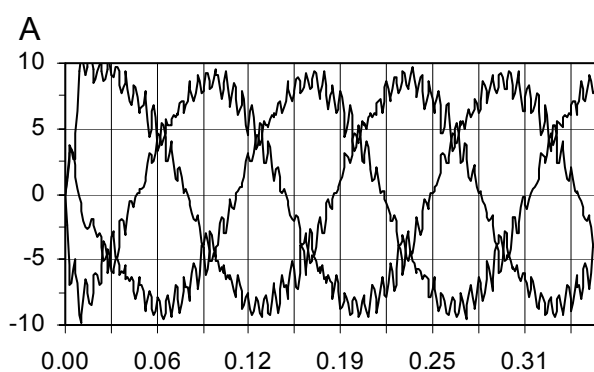


Рис. 3. $i_{HS4}, i_{HS5}, i_{HS6}$ – струми розщеплених віток навантаження для другої зірки

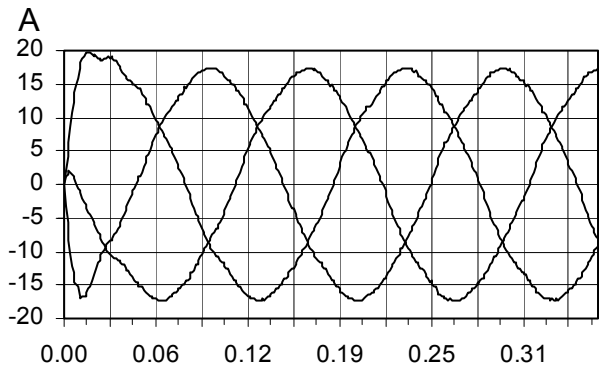


Рис. 4. i_{μ_1} , i_{μ_2} , i_{μ_3} – сумарні струми розщеплених віток навантаження

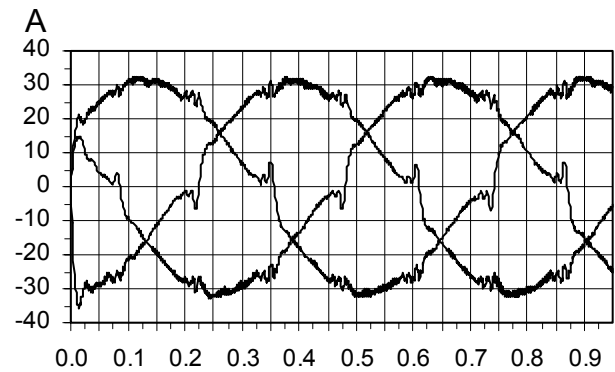


Рис. 5. i_{HS_1} , i_{HS_2} , i_{HS_3} – струми розщеплених віток навантаження для мостової схеми БТТЧ

Висновки. Аналіз результатів розрахунків електромагнітних процесів у КМЗ при комбінованому керуванні тиристорами дозволив зробити такі принципові висновки:

1. Вищу якість струмів збудження забезпечує система збудження з неоднаковою кількістю пар полюсів електричних машин модулятора.

2. Електрична схема силового кола модульованого збуджувача з потенціальним комбінованим розділенням розщеплених віток машин модулятора забезпечує найвищу якість струмів збудження генератора порівняно з двома іншими (окремим та зі спільним нулем).

3. Зменшення електромагнітного зв'язку за потоками розсіювання між розщепленими вітками однойменних фаз обмотки збудження сприяє підвищенню якості струму збудження. Для досягнення цього необхідно розщеплені вітки фаз обмотки збудження генератора розміщати у різних пазах.

1. Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током. – М., 1974. 2. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты // Тр. I Междунар. (III Всероссийской) конф. по электромехатронике. – Санкт-Петербург, 1997. – С. 182–192. 3. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель генератора стабільної частоти на базі каскадного трипульсного електромашинного модулятора // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2000. – № 403. – С. 11–20. 4. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи “Асинхронний генератор з трипульсним модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів” // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка. – К.: ІЕД НАН України, 2000. – С. 153–163. 5. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Выща школа, 1986. – 164 с.