

СТРУКТУРА МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
З ЖИВЛЕННЯМ ВІД РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

ЗМІСТ

Стор.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	3
ВСТУП	4
1 АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ	5
2 СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТРН-АД	10
ВИСНОВКИ	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	24

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД	– асинхронний двигун
АЕП	– асинхронний електропривод
ТРН	– тиристорний регулятор напруги
ЕРС	– електрорушійна сила
МРС	– магнитурушійна сила
ЧОР	– частота обертання ротора
L_s	– індуктивність фази статора, Гн
r_r	– активний опір фази ротора, Ом
L_r	– індуктивність фази ротора, Гн
L_0	– індуктивність головного магнітного поля АД, Гн
ω	– частота обертання ротора АД, рад/с
M	– електромагнітний момент АД, Н·м
E	– э.р.с. обертання в фазній обмотці статора АД, В

ВСТУП

Основним засобом реалізації технологічних процесів в промисловості є електропривод [1]. Найбільшими перевагами в експлуатації, економічності та надійності відрізняється асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором [1]. Сучасний рівень розвитку силової перетворювальної техніки дозволило вирішити задачу регулювання координат руху асинхронних електроприводів (АЕП) в широкому діапазоні (на основі застосування транзисторних перетворювачів) при досягненні прийнятних економічних та надійностних показників [1 – 3].

Для реалізації процесів, що характеризуються обмеженою кількістю фіксованих рівней швидкості АД, застосування транзисторного перетворювача частоти зі звеном постійного струму є схемно надлишковим і економічно невиправданим. В той же час відомі "маловентильні", в основному тиристорні або діодно-тиристорні регулятори напруги відрізняються обмеженістю функціональних можливостей [1 – 3, 4 - 12].

Сучасний стан засобів обчислювальної техніки і програмного забезпечення дозволяє з високою точністю вирішувати задачі математичного моделювання складних електромагнітних і електромеханічних процесів в системі "напівпровідниковий регулятор – асинхронний двигун" [13 – 16] і на підставі отриманих даних обґрунтувати алгоритми управління та схемні рішення таких систем, що уявляє науковий інтерес і актуально в аспекті практичної реалізації.

Вказані обставини обумовлюють актуальність дослідження процесів в системі "напівпровідниковий регулятор напруги – асинхронний двигун" в квазічастотному режимі з метою встановлення особливостей змінення основних параметрів системи в процесі регулювання. Електротехнічний комплекс, що представляє об'єкт дослідження, складається з асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і тиристорного регулятора напруги, включеного в коло його статора. Дослідження процесів у цьому об'єкті в режимі

квазічастотного електроживлення АД раціонально виконувати на основі математичного і комп'ютерного моделювання.

1 АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ

Аналітичне моделювання асинхронного двигуна базується на дослідженнях Ковача и Раца і передбачає векторно-матричний запис рівнянь моделі АД [17]. Розрахункову схему заміщення однієї фази АД подано на рис. 1.1. Побудова моделі передбачає уведення алгебраїчних векторів-стовбчиків, складених з миттєвих значень напруг, струмів і потокозчеплень фазних обмоток статора і ротора:

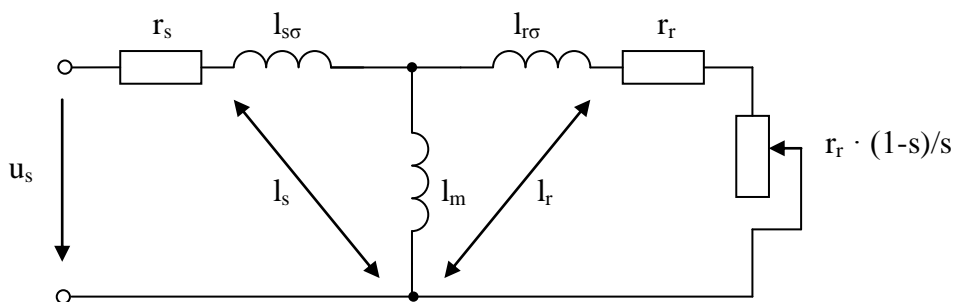


Рисунок 1.1 - Схема заміщення фази асинхронного двигуна

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_s^{Fs} &= [u_A \quad u_B \quad u_C]^T \\
 \mathbf{U}_r^{Fr} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
 \mathbf{I}_s^{Fs} &= [i_A \quad i_B \quad i_C]^T \\
 \mathbf{I}_r^{Fr} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\
 \Psi_s^{Fs} &= [\psi_A \quad \psi_B \quad \psi_C]^T \\
 \Psi_r^{Fr} &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Вектори статорних перемінних представлені в базисі F_s , неподвижному відносно статора (рис. 1.2, а), а вектори роторних - в базисі F_r , фіксованому відносно ротора (рис. 1.2, б). Тоді рівняння рівноважності ЕРС на обмотках статора і ротора в матричній формі мають вигляд [17]:

для статора –

$$\mathbf{U}_s^{F_s} = r_s \cdot \mathbf{I}_s^{F_s} + p \cdot \Psi_s^{F_s}; \quad (1.2)$$

для ротора –

$$\mathbf{U}_r^{F_r} = r_r \cdot \mathbf{I}_r^{F_r} + p \cdot \Psi_r^{F_r}, \quad (1.3)$$

де r_s, r_r - активні супротивлення обмоток статора і ротора, Ом;
 $p = d/dt$ - оператор диференціювання перемінних за часом.

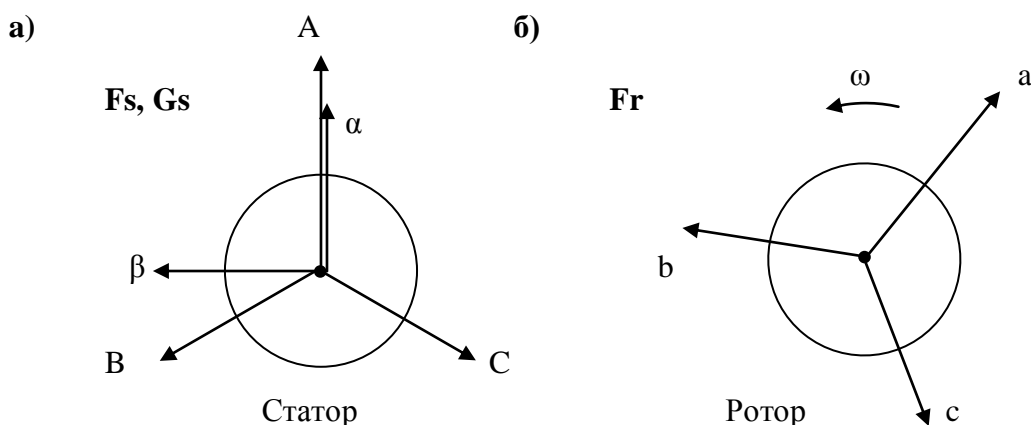


Рис. 1.2 - Координаты для представления векторов переменных состояния асинхронного двигателя

Взаємозв'язок поточкозчеплень обмоток зі струмами визначається згідно [17]. В частині, для фази А статора:

$$\Psi_A = L_s i_A + M_s i_B + M_s i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \quad (1.4)$$

де L_s , - власна індуктивність обмоток статора; M_s - взаємна індуктивність між обмотками статора; M_{Aa} , M_{Ab} , M_{Ac} - взаємні індуктивності між фазною обмоткою статора і обмотками відповідних фаз ротора.

Потокозчеплення для інших обмоток статора і ротора записуються аналогічно. З метою виключення періодичних коефіцієнтів перемінні стану АД приводяться до єдиної системи координат F_s , неподвижної відносно статора (рис. 1.2, а). Відповідні рівняння відносно ЕРС і потокозчеплень АД в базисі F_s будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_s^{Fs} &= r_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + p \cdot \Psi_s^{Fs} \\ \mathbf{U}_r^{Fs} &= r_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} + p \cdot \Psi_r^{Fs} - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_3 \cdot \Psi_r^{Fs} \\ \Psi_s^{Fs} &= l_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + l_m \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} \\ \Psi_r^{Fs} &= l_m \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + l_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

де z_p - число пар полюсів обмотки статора; ω – кутова швидкість ротора АД, рад/с; \mathbf{B}_3 - матриця ортогонального повороту; l_s , l_r - повна індуктивність, відповідно, обмоток статора і ротора; l_m - взаємна індуктивність між статорними і роторними обмотками.

Рівняння електромеханічного перетворення енергії в АД [18, 19]:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot l_m \cdot \text{mod}(\Psi_r \times \Psi_s)}{2 \cdot k}, \quad (1.6)$$

де M - електромагнітний момент АД; $k = l_s l_r - l_m^2$.

Таким чином, система рівнянь моделі АД для комп'ютерного моделювання в системі координат, жорстко зв'язаною зі статором, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \mathbf{U}_s &= r_s \cdot \mathbf{I}_s + p \cdot \Psi_s \\
 \mathbf{U}_r &= r_r \cdot \mathbf{I}_r + p \cdot \Psi_r - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r \\
 \Psi_s &= l_s \cdot \mathbf{I}_s + l_m \cdot \mathbf{I}_r \\
 \Psi_r &= l_m \cdot \mathbf{I}_s + l_r \cdot \mathbf{I}_r \\
 M &= \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} \\
 p \cdot \omega &= (M - M_c) / J_\pi
 \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

де \mathbf{B}_2 - матриця ортогонального повороту двохмірного вектора

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Після підстановки виразу електромагнітного моменту в рівняння механічної рівноваги та перетворення отриманих рівнянь для розв'язання чисельними методами, одержимо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned}
 p \cdot \Psi_s &= \mathbf{U}_s - \frac{r_s \cdot l_r}{k} \Psi_s + \frac{r_s \cdot l_m}{k} \Psi_r \\
 p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{l_s \cdot r_r}{k} \Psi_r + \frac{l_m \cdot r_r}{k} \Psi_s \\
 p \cdot \omega &= \left(\frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_\pi
 \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Вирази для знаходження струмів статора і ротора по значенням потокозчеплень :

$$\mathbf{I}_s = \frac{l_r}{k} \cdot \Psi_s - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_r, \quad (1.9)$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{l_s}{k} \cdot \Psi_r - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_s. \quad (1.10)$$

При розгляді процесу відключення АД за умови, що раоз'єднення кола електроживлення всіх фаз статора здійснюється одночасно, приймаємо до уваги суттєвий вплив на процеси потокозчеплення ротора АД [12]:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0} - r_r \cdot \int_0^{t_l} \mathbf{I}_r dt, \quad (1.11)$$

де Ψ_{r0}, Ψ_{r1} - вектори потокозчеплення ротора до і після комутації кола статора; t_l - тривалість комутації кола статора.

З допущення, що відключення АД здійснюється миттєво, а величина активного супротиву ротора – незначна, слідує, що другим членом правої частини (1.11) можна пренебрець: $\Psi_{r1} = \Psi_{r0}$,

По закінченні відключення ток статора дорівнює нулю, а потокозчеплення описиваються системою [17]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s1} &= l_m \cdot \mathbf{I}_{r1} \\ \Psi_{r1} &= l_r \cdot \mathbf{I}_{r1} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Таким чином, $\Psi_{s1} = k_r \Psi_{r0} = k_r \Psi_{r1}$, де k_r - коефіцієнт св'язку ротора:

$$k_r = \frac{l_m}{l_r}.$$

Система рівнянь відносно стану АД після його відключення від мережі, адаптована для комп'ютерного моделювання процесів, має вигляд [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_s &= k_r \cdot \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{r_r}{l_r} \Psi_r \\ p \cdot \omega &= \left(\frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_n \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

2 СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТРН-АД

Особливістю електроживлення АД от ТРН в режимі квазічастотного управління є те, що силове коло АД внаслідок переключення груп тиристорів періодично змінює структуру, що відображується на структурі систем рівнянь. Тому слід скласти чотири різних структурних схем для моделювання чотирьох різних станів режиму електроживлення АД, що моделюють АЭП в трифазному і двофазних режимах роботи (при відключенні однієї з фаз статора). При цьому необхідно передбачити переключення між окремими моделями зі збереженням попередніх початкових умов, що затруднено. Тому доцільно скласти одну структурну схему, з необхідними переключеннями між блоками.

Структурну схему комп'ютерної моделі АЭП с ТРН подано на рис.2.1. Основними складовими схеми є: блок моделі АД с короткозамкненим ротором (AD), блок моделі тиристорного перетворювача (thyristor) і блок управління тиристорним перетворювачем (control system). Допоможні блоки структурної схеми моделі – це підсистеми, призначені:

- для організації виводу даних "SubSystem1";
- для розрахунку середнього (за заданий інтервал часу) значення моменту, що розвиває двигун "МОМЕНТ";
- для розрахунку середнього (за заданий інтервал часу) значення частоти обертання вала електродвигуна "ОМЕГА",
- для розрахунку діючого значення струму статора електродвигуна "ТОК Ia".

Крім того, в структуру моделі привода необхідно увести:

- блок завдання статичного моменту навантаження на валу електродвигуна (Ms);
- блок завдання величини кута управління тиристорним регулятором напруги (angle control).

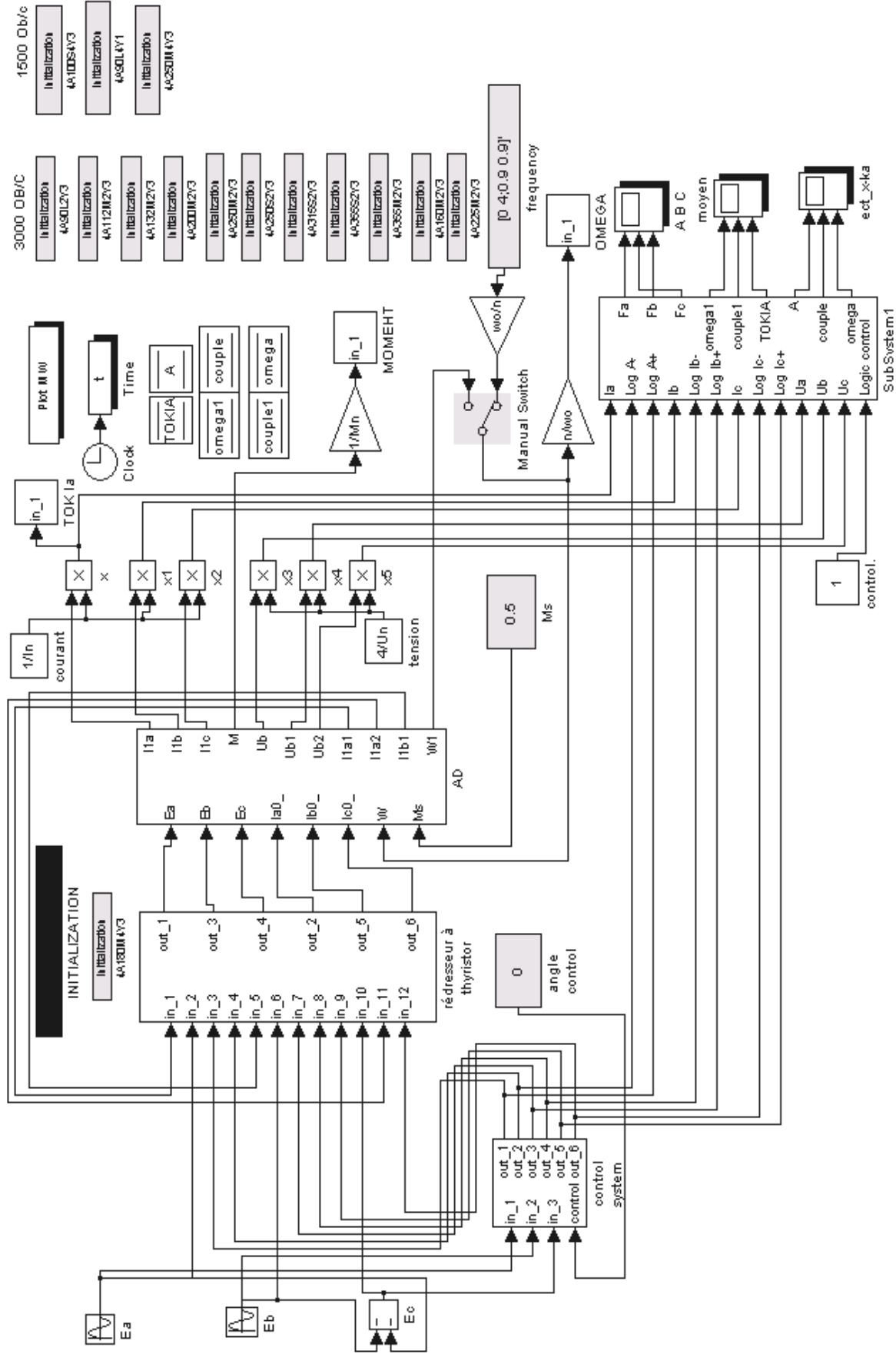


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема моделі асинхронного електропривода з ТРН

Слід передбачити також можливість завдання частоти обертання вала електродвигателя (блок "frequency").

Структура комп'ютерної моделі АД з живленням від ТРН, стосовно до пакету MATLAB, може бути складена на основі використання приведених вище матричних рівнянь, для чого розкриємо їх стрічки:

$$\begin{aligned}
 & (R_s + pL_{s\sigma}) \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + pM \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}M \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} = \\
 & = \begin{vmatrix} R_s i_A^S & pL_{s\sigma} i_A^S \\ R_s i_B^S & pL_{s\sigma} i_B^S \\ R_s i_C^S & pL_{s\sigma} i_C^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S - 0.5 pMi_C^S \\ pMi_B^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_C^S \\ pMi_C^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S \end{vmatrix} = \\
 & = \begin{vmatrix} R_s i_A^S + pL_{s\sigma} i_A^S + pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S - 0.5 pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{ra} \\ R_s i_B^S + pL_{s\sigma} i_B^S + pMi_B^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{rb} \\ R_s i_C^S + pL_{s\sigma} i_C^S + pMi_C^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S + \frac{3}{2} pMi'_{rc} \end{vmatrix} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

$$pM \times \begin{vmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + \omega_r M \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + (R_r + pL_r) \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} + \frac{2}{3} \omega_r L_r \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \begin{vmatrix} 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 & 0 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_C^S \\ pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S \\ pMi_C^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_A^S \end{vmatrix} + \\
& + \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_C^S \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_C^S \\ \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_B^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} \\ R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} \\ R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_b \end{vmatrix} = \\
& = \begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_B^S - \\ pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_A^S + \\ pMi_C^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_A^S - \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_C^S + R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_c \\ + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_C^S + R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_c \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\omega_r Mi_B^S + R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega_r L_r i'_b \end{vmatrix}. \quad (2.2)
\end{aligned}$$

Таким чином, одержуємо систему рівнянь, що описує асинхронний двигун через фазні величини струмів та напруг для трехфазного режиму роботи АД:

$$\left\{ \begin{array}{l}
u_A^S = R_s i_A^S + p L_{\sigma s} i_A^S + p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i_{ra}' \\
u_B^S = R_s i_B^S + p L_{\sigma s} i_B^S + p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i_{rb}' \\
u_C^S = R_s i_C^S + p L_{\sigma s} i_C^S + p M i_C^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S + \frac{3}{2} p M i_{rc}' \\
0 = p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\
+ R_r i_{ra}' + p L_r i_{ra}' + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{rb}' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{rc}' \\
0 = p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\
+ R_r i_{rb}' + p L_r i_{rb}' + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{ra}' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{rc}' \\
0 = p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \\
+ R_r i_{rc}' + p L_r i_{rc}' + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{ra}' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_{rb}'
\end{array} \right. \quad (2.3)$$

При роботі від ТРН має місце неоднократне відключення різних фаз статора від мережі, та чередування трифазного, двофазного режимів роботи АД і безструмових пауз. При змінній структурі силового кола змінюється і система рівнянь, що описують двигун. Тому, необхідно отримати рівняння для двофазних режимів роботи АД і передбачити відповідні переключення в моделі. Для цього в моделі двигуна передбачити не статорні напруги, а фазні ЕРС (E_a , E_b , E_c) мережі живлення. З метою імітації станів тиристорних ключей регулятора напруги в моделі передбачені ключі к1, к2, к3. В моделі також передбачені: e_r – ЕРС обертання двигуна; $Z_{\text{н}}$ – повний супротив фази двигуна. Для даної схеми при трифазному режимі роботи можемо записати систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
i_a + i_b + i_c = 0, \\
u_A^S - u_B^S = E_a - E_b, \\
u_B^S - u_C^S = E_b - E_c.
\end{array} \right. \quad (2.4)$$

Перепишем последние два уравнения в іншому вигляді:

$$\begin{aligned}
 0 &= E_a - E_b - u_A^S + u_B^S \\
 0 &= E_b - E_c - u_B^S + u_C^S.
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Після підстановки в (2.5) напруги із (2.3), одержим для симетричного режиму вирази, які покладені в основу моделі в середовищі MATLAB:

$$\begin{aligned}
 \frac{(M + L_{s\sigma})pi_C^S}{R_s} &= \frac{1}{R_s} \left(0.5pMi_A^S + 0.5pMi_B^S - \frac{3}{2}pMi_{rc}' - R_s i_C^S + E_c - E_b - \right. \\
 &\left. - \left(-0.5pMi_A^S + R_s i_B^S + (M + L_{s\sigma})pi_B^S \right) - 0.5pMi_C^S + \frac{3}{2}pMi_{rb}' \right),
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

де $i_B^S = -(i_A^S + i_C^S)$.

Для двофазного режиму роботи слід розглянути три варіанти включення АД - при відсутності струму в фазах "А"; "В"; "С". Відповідні схеми заміщення зображені на рис.2.2. Рівняння (2.5) приймають вид :

при відключенні фази С

$$E_a - E_b = u_A^S - u_B^S,$$

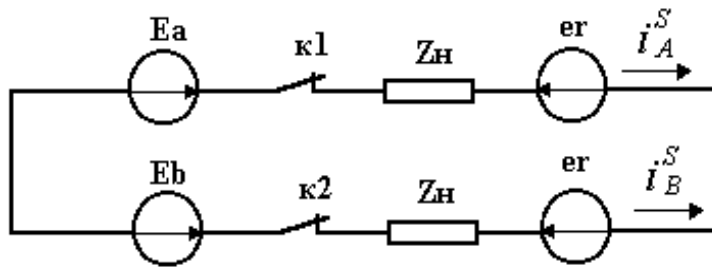
при відключенні фази В

$$E_a - E_c = u_A^S - u_C^S,$$

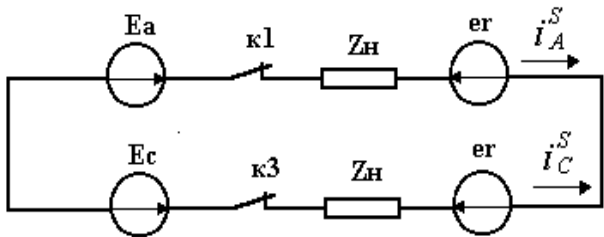
при відключенні фази А

$$E_b - E_c = u_B^S - u_C^S.$$

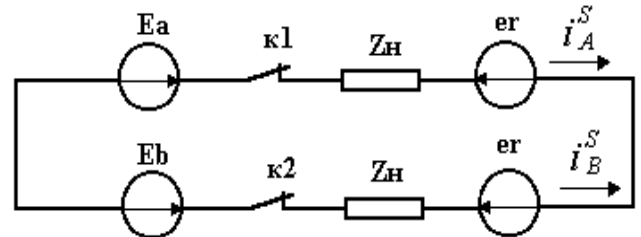
Для отримання рівнянь АД в двофазному режимі роботи із системи рівнянь (2.3) слід виключити ті складові, в яких присутні струми виключених фаз. Після такого виключення отримаємо для кожної схеми включення АД такі системи рівнянь:



а)



б)



в)

Рисунок 2.2 - Схемы замещения АД в несимметричном режиме работы

а) – отключена фаза С, б) – отключена фаза В, в) – отключена фаза А

1) для схемы рис. 2.2,а

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_A^S = R_s i_A^S + p L_{\sigma s} i_A^S + p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{ra} \\
 u_B^S = R_s i_B^S + p L_{\sigma s} i_B^S + p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{rb} \\
 u_C^S = 0 \\
 0 = p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \\
 \quad + R_r i'_{ra} + p L_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \\
 \quad + R_r i'_{rb} + p L_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = -0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \\
 \quad + R_r i'_{rc} + p L_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b
 \end{array} \right. , \quad (2.7)$$

2) для схемы рис. 2.2,б

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_A^S = R_s i_A^S + p L_{\sigma s} i_A^S + p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{ra} \\
 u_B^S = 0 \\
 u_C^S = R_s i_C^S + p L_{\sigma s} i_C^S + p M i_C^S - 0.5 p M i_A^S + \frac{3}{2} p M i'_{rc} \\
 0 = p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\
 \quad + R_r i'_{ra} + p L_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = -0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\
 \quad + R_r i'_{rb} + p L_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = p M i_C^S - 0.5 p M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + R_r i'_{rc} + p L_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b
 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

3) для рис.2.2.с.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_A^S = 0 \\
 u_B^S = R_s i_B^S + p L_{\sigma s} i_B^S + p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{rb} \\
 u_C^S = R_s i_C^S + p L_{\sigma s} i_C^S + p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S + \frac{3}{2} p M i'_{rc} \\
 0 = -0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\
 \quad + R_r i'_{ra} + p L_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + R_r i'_{rb} + p L_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\
 0 = p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + R_r i'_{rc} + p L_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b
 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Аналітичні вирази для обчислення споживаної потужності та електромагнітного момента реальної трифазної машини получаются із рівнянь (2.3) при запису їх у виді матричного рівняння

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{X}p\mathbf{i} + \mathbf{G}p\omega\mathbf{i} \quad , \quad (2.10)$$

де $\mathbf{u} = \left| u_A^S \quad u_B^S \quad u_C^S \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right|$,

$$\mathbf{i} = \left| i_A^S \quad i_B^S \quad i_C^S \quad i'_{ra} \quad i'_{rb} \quad i'_{rc} \right|$$

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{vmatrix} ,$$

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} L_s & -0.5M & -0.5M & \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ -0.5M & L_s & -0.5M & 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ -0.5M & -0.5M & L_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M \\ M & -0.5M & -0.5M & L_r & 0 & 0 \\ -0.5M & M & -0.5M & 0 & L_r & 0 \\ -0.5M & -0.5M & M & 0 & 0 & L_r \end{vmatrix} ,$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r \\ \frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r & 0 \end{pmatrix}.$$

Множення виразу (2.10) на \mathbf{i}_t дає:

$$\mathbf{i}_t \times \mathbf{u} = \mathbf{i}_t \times \mathbf{Ri} + \mathbf{i}_t \times \mathbf{Xpi} + \mathbf{i}_t \times \mathbf{Gp}\omega, \mathbf{i} \quad (2.11)$$

Ліва частина виразу (2.11) представляє собою повну мгновенну потужність трифазної машини. Перший член правої частини представляє сумарну потужність втрат АД. Другий член - мгновенна потужність в індуктивності, що характеризує енергію магнітного поля машини. Третій член представляє собою мгновенну потужність, яка визначає механічну енергію та електромагнітний момент двигуна:

$$M_S = \frac{1}{\omega_r} \times \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_b' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_c' \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_a' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_c' \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_a' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_b' \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{ra}' \\ i_{rb}' \\ i_{rc}' \end{pmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_a' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_c' \right) \times i_{ra}' + \\
&+ \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_a' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_c' \right) \times i_{rb}' + \\
&+ \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_a' - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i_c' \right) \times i_{rc}' = \\
&= \frac{\sqrt{3}}{2} \left[(i_B^S - i_A^S) i_{ra}' + (i_C^S - i_A^S) i_{rb}' + (i_A^S - i_B^S) i_{rc}' \right]
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Модель АЭП побудована як єдина структура, а переключення режимів роботи здійснюється за допомогою стандартних в середовищі MATLAB блоків – ключей Switch по сигналах стану тиристорів, які поступають із підсистеми моделювання ТРН.

На основі наведеного вище математичного опису побудовано модель асинхронного електродвигуна в середовищі MATLAB–AD. Її структурну схему подано на рис. 2.3. Структура моделі адаптована до розв'язання задачі імітації станів ключей ТРН. Відключення фази А або С імітується ключем Switch5 або Switch підсистеми Su3 (рис 2.4, а.). З метою моделювання відключення фази В рівняння для двофазного режиму слід спростити:

$$\begin{aligned}
0 = & E_a - E_c - i_A^S R_s - (M + L_{s\sigma}) p i_A^S - 0.5 M p i_A^S - \frac{3}{2} M p i_{ra}' + \\
& + i_C^S R_s + (M + L_{s\sigma}) p i_C^S + 0.5 M p i_C^S - \frac{3}{2} M p i_{rc}'
\end{aligned} \tag{2.13}$$

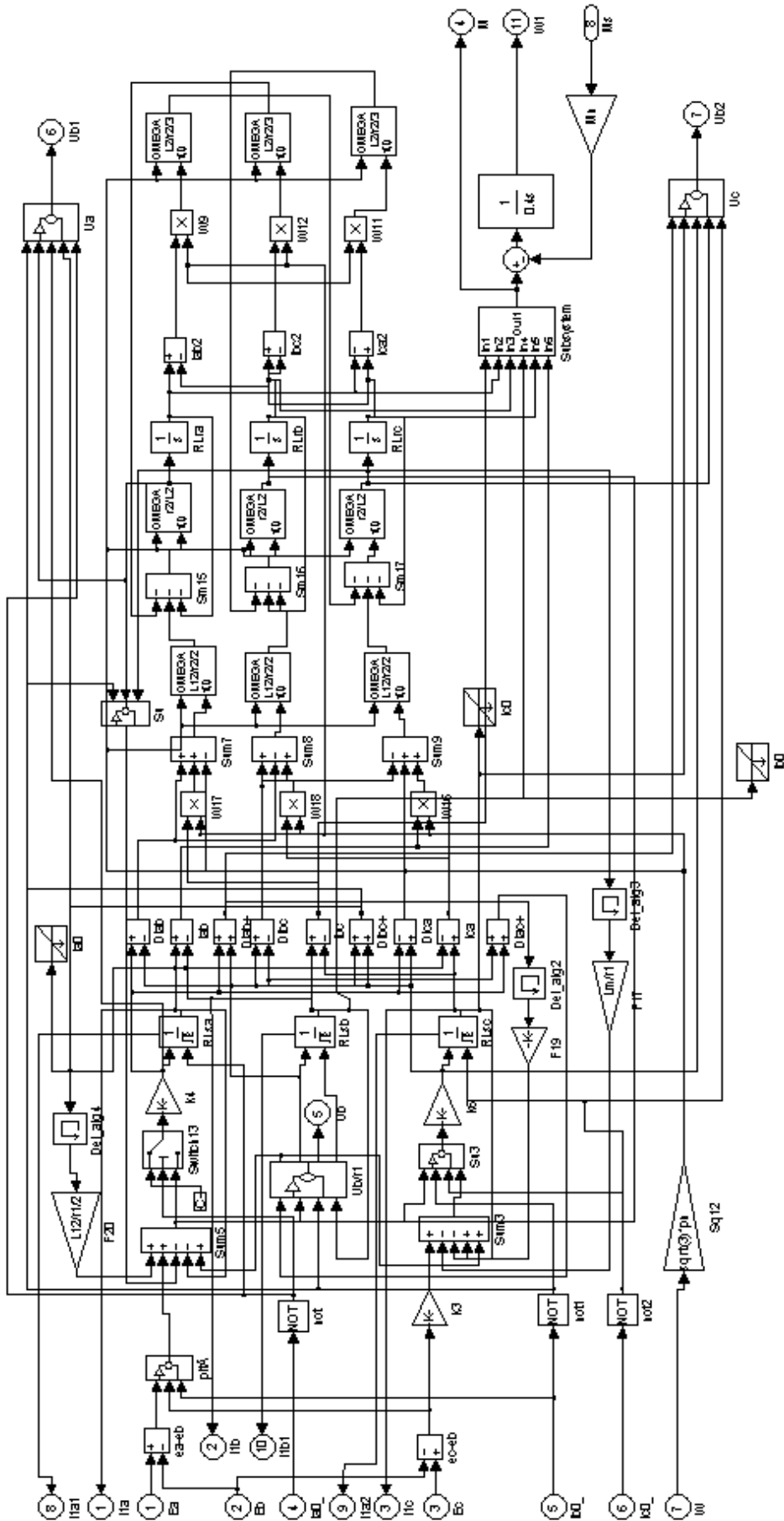
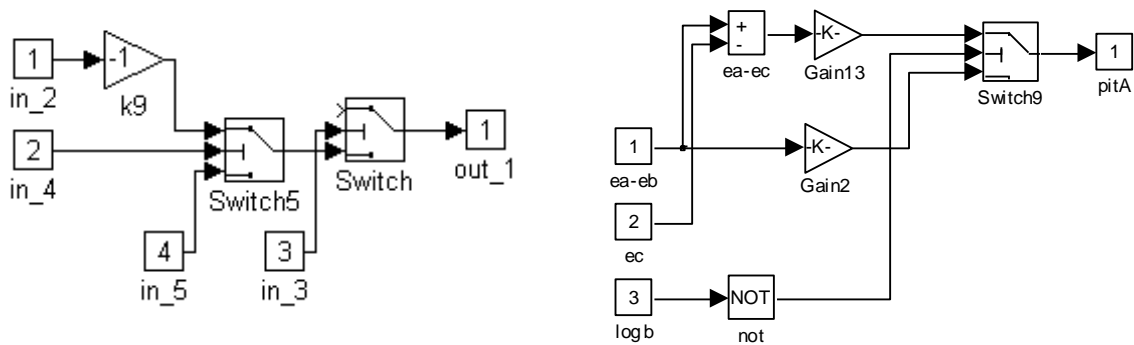


Рисунок 2.3 - Структурна схема блока моделі асинхронного двигуна с короткозамкненим ротором



а б
Рисунок 2.4 – Схеми підсистем «Su3»(а) і «питА» (б)

Оскільки $i_A^S = -i_C^S$, то підставивши i_C^S і приведші подібні складові, маємо:

$$\frac{(M + L_{s\sigma})i_{Ap}^S}{R_s} = \frac{E_a - E_c}{2R_s} - i_A^S - \frac{0.5Mi_{Ap}^S}{R_s} - \frac{3}{4}i'_{ra}Mp + \frac{3}{4}i'_{rc}Mp . \quad (2.14)$$

Таке спрощення дозволяє за допомогою підсистем «питА» (рис. 2.6), Su та Su3 реалізувати заданий режим роботи асинхронної машини.

За допомогою підсистеми Su (рис. 2.5) на суматор Sum подається різниця $\frac{3}{4}i'_{ra}Mp - \frac{3}{4}i'_{rc}Mp$.

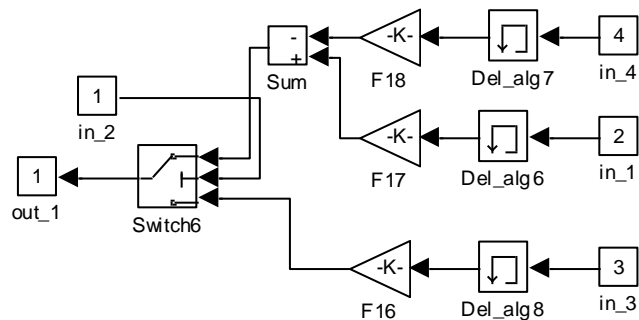


Рисунок 2.5 – Схеми підсистеми Su

На вхід підсистеми Su «in_2» поступає сигнал про наявність напруги в фазі В, на входи in_1 та in_4 поступають похідні струмів ротора i_a та i_c , а на вхід in_3 похідна струму i_a . Для подачі струму i_c в роторну частину, а також для збереження початкових умов при включенні (відключенні) фази В струм i_a інвертується і подається через інтегратор RLsc (рис.2.5) за допомогою підсистеми Su3. При наявності на вході in_4 одиничного сигналу ключ Switch5 замикається на перший вхід і на інтегратор поступає інвертований струм i_a . Комутація фаз статора АД ключами Switch здійснюється одиничними сигналами на відповідних входах "in_".

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано модель АД, що відрізняється комплексним врахуванням впливу електромагнітних і електромеханічних параметрів АД, і дозволяє встановити параметри об'єкта при квазічастотному і фазовоу способах управління величиною напруги живлення кола статора двигуна.

Наукове значення роботи заключається в розвитку теорії регульованого асинхронного електропривода, зокрема, теоретичних питань квазічастотного електроживлення асинхронного електродвигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985, – 560 с.
2. Ильинский Н.Ф., Юньков М.Г. Проблемы теории и практики автоматизированного электропривода // Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия, 1986. - С. 5-11.
3. Ильинский Н. Ф., Юньков М. Г. Итоги развития и проблемы электропривода // Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 4 – 14.
4. Тиристорный электропривод рудничных и взрывозащищённых электроустановок: Справочное пособие // Б. Л. Коринев, А. А. Дубинский, В. А. Скрыпник и др. / Под ред. А. И. Пархоменко. – М.: Недра, 1991. – 173 с.
5. Международный научно – технический семинар по проблемам регулируемого электропривода механизмов собственных нужд тепловых электростанций и сетей // Электрические станции, 2000. – № 3. – С. 58 – 60.
6. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
7. Беляев Д. В. Результаты внедрения регулируемых высоковольтных электроприводов переменного тока на территории СНГ // Электроприводы переменного тока: Тр. 12 научно – технич. конф. (13 – 16 марта 2001 г.). Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 210 – 213.

8. Смолдырев А. Е. Гидро- и пневмотранспорт. – М.: Металлургия, 1975. – 384 с.
9. Альтшуллер М. И., Иванов А. Г., Кальсин В. Н., Саевич В. Л. и др. Регулируемые электроприводы и системы автоматизации в нефтедобыче // Труды III Международной (IV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП – 2001 (Нижний Новгород 21 – 14 сентября 2001) / Под ред. С. В. Хватова. – Нижний Новгород: "Вектор – Т и С", 2001. – С. 162 – 163.
10. Волков А.И., Каваре Я.Х. Исследование характеристик тиристорного асинхронного электропривода с целью определения области его применимости // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 2 (8). – С.18 – 20.
12. Луговой А. В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5.– С. 62 – 67.
13. Герман – Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебн. пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
14. Лозинський О., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту "Львівська політехніка", 2000. – 166 с.
15. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 376 с.
16. Костинюк Л. Д. та ін. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів: Вид-во Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 404 с.
17. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
18. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

19. Фираго Б. И., Павлович С. Н. Выходное напряжение и ток преобразователя частоты с непосредственной связью при работе на асинхронный двигатель / Изв. Вузов СССР – Энергетика. – М., 1972. – № 3. – С. 33 – 39.