

УДК 629.735

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ КАНАЛА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ю.П. АРТЕМЕНКО¹, А.Г. ДЕМЧЕНКО¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

В настоящее время наблюдается повышение уровня электрифицированности воздушных судов (ВС). Эти работы ведутся в рамках концепции создания полностью электрифицированного самолета (ПЭС), на котором функции отдельных самолетных систем (пневматической и гидравлической) будет выполнять электрическая система. Итогом данных работ будет существенное увеличение доли электродвигательных нагрузок на борту ВС. Как следствие произойдет увеличение мощности источников электроэнергии системы электроснабжения ВС. Данная работа посвящена математическому моделированию асинхронного двигателя. Рассматривается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. При получении математической модели асинхронного двигателя были рассмотрены модели электрической и механической частей, что позволяет учитывать взаимосвязь электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в переходных и установившихся режимах работы электродвигателя. Модель электрической части реализована на уравнениях для напряжений обмоток и потокосцеплений контуров асинхронного двигателя, записанных в системе фазных координат «АВС». При рассмотрении математической модели механической части использовалось уравнение моментов, действующих на вал асинхронного двигателя при вращательном движении. Была получена система матричных уравнений – математическая модель асинхронного двигателя. В результате решения системы матричных уравнений были получены выражения для токов фаз обмотки статора и короткозамкнутых контуров ротора асинхронного двигателя. Полученная математическая модель описывает электромагнитные и электромеханические процессы асинхронного двигателя в неподвижной системе фазных координат «АВС». Данная модель в отличие от модели во вращающихся координатах «dq» описывает процессы как в симметричных, так и в несимметричных режимах, таких как обрывы фаз (неполнофазные режимы) и короткие замыкания фаз асинхронного двигателя, в то время как математическая модель, реализованная в системе вращающихся координат «dq», верна только для симметричных режимов работы электродвигателя.

Ключевые слова: математическое моделирование, система электроснабжения, асинхронный двигатель, трехфазная нагрузка, переменный ток.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работах [1–5] были получены математические модели агрегатов бортовой системы электроснабжения (СЭС) переменного тока: авиационного синхронного генератора, регулятора напряжения, блока защиты и управления каналом генерирования, активного синхронизатора, привода постоянной частоты вращения, трехфазной статической активно-индуктивной нагрузки. В данной работе рассматривается математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в составе канала бортовой СЭС переменного тока.

СТРУКТУРА КАНАЛА БОРТОВОЙ СЭС ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При рассмотрении элементов канала бортовой СЭС переменного тока за основу была взята типовая структурная схема канала бортовой СЭС переменного тока среднемагистрального самолета (рис. 1).

На схеме канала бортовой СЭС (рис. 1) обозначены следующие элементы:

R_{AL} , R_{BL} , R_{CL} – активные сопротивления соединительных проводов фаз А, В, С; L_{AL} , L_{BL} , L_{CL} – индуктивности соединительных проводов фаз А, В, С; R_N , L_N – активное сопротивление и индуктивность нейтрального провода генератора.

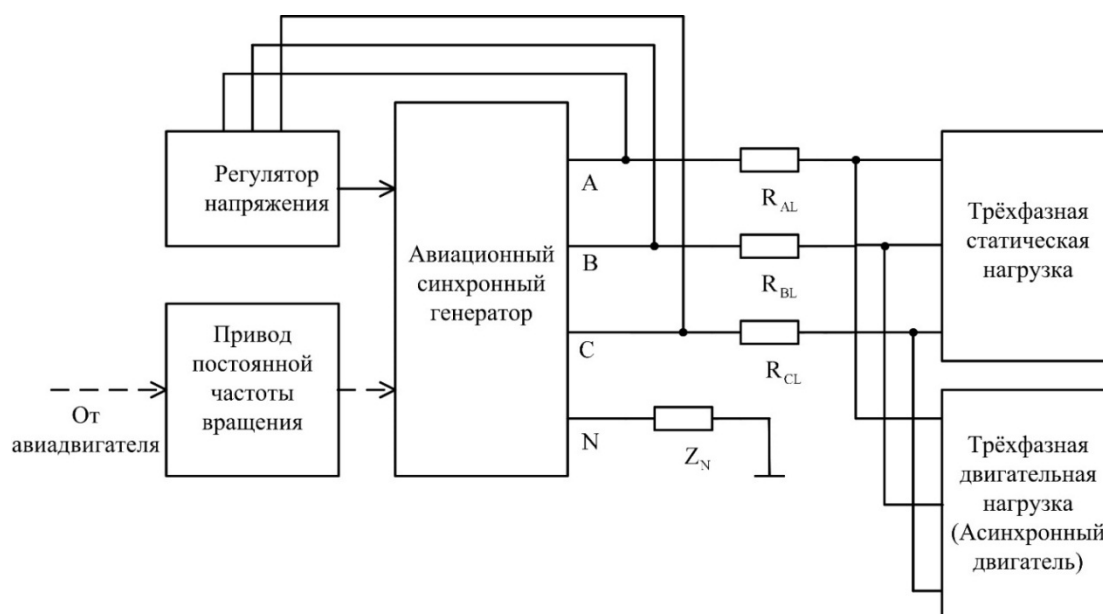


Рис. 1. Структурная схема канала бортовой СЭС переменного тока
Fig. 1. Channel block diagram of the onboard power supply system of AC

Для получения математической модели асинхронного двигателя необходимо рассмотреть математические модели электрической и механической частей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Рассмотрим уравнения для напряжений и потокосцеплений обмоток статора и ротора асинхронного двигателя, записанные в фазной системе координат [6].

Система уравнений напряжений обмотки статора асинхронного двигателя имеет вид

$$\begin{cases} u_{SA}(t) = \frac{d\psi_{SA}(t)}{dt} + r_S i_{SA}(t); \\ u_{SB}(t) = \frac{d\psi_{SB}(t)}{dt} + r_S i_{SB}(t); \\ u_{SC}(t) = \frac{d\psi_{SC}(t)}{dt} + r_S i_{SC}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{SA}(t)$, $u_{SB}(t)$, $u_{SC}(t)$ – мгновенные значения фазных напряжений асинхронного двигателя; $\psi_{SA}(t)$, $\psi_{SB}(t)$, $\psi_{SC}(t)$ – мгновенные значения потокосцеплений контуров статора асинхронного двигателя; $i_{SA}(t)$, $i_{SB}(t)$, $i_{SC}(t)$ – мгновенные значения фазных токов асинхронного двигателя; r_S – активное сопротивление фазы асинхронного двигателя.

Применяя к системе уравнений (1) преобразование Лапласа, получаем

$$\begin{cases} U_{SA}(p) = p\Psi_{SA}(p) + r_S I_{SA}(p); \\ U_{SB}(p) = p\Psi_{SB}(p) + r_S I_{SB}(p); \\ U_{SC}(p) = p\Psi_{SC}(p) + r_S I_{SC}(p). \end{cases} \quad (2)$$

В матричной форме система уравнений (2) запишется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} U_{SA}(p) \\ U_{SB}(p) \\ U_{SC}(p) \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \Psi_{SA}(p) \\ \Psi_{SB}(p) \\ \Psi_{SC}(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{SA}(p) \\ I_{SB}(p) \\ I_{SC}(p) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Система уравнений напряжений контуров ротора

$$\begin{cases} 0 = \frac{d\psi_{RA}(t)}{dt} + r_R i_{RA}(t); \\ 0 = \frac{d\psi_{RB}(t)}{dt} + r_R i_{RB}(t); \\ 0 = \frac{d\psi_{RC}(t)}{dt} + r_R i_{RC}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\psi_{RA}(t)$, $\psi_{RB}(t)$, $\psi_{RC}(t)$ – мгновенные значения потокосцеплений контуров ротора асинхронного двигателя; $i_{RA}(t)$, $i_{RB}(t)$, $i_{RC}(t)$ – мгновенные значения токов цепей ротора асинхронного двигателя; r_R – активное сопротивление фаз роторной обмотки.

Применяя к системе уравнений (4) преобразование Лапласа, получаем

$$\begin{cases} 0 = p\Psi_{RA}(p) + r_R I_{RA}(p); \\ 0 = p\Psi_{RB}(p) + r_R I_{RB}(p); \\ 0 = p\Psi_{RC}(p) + r_R I_{RC}(p). \end{cases} \quad (5)$$

В матричной форме система уравнений (5) запишется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \Psi_{RA}(p) \\ \Psi_{RB}(p) \\ \Psi_{RC}(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_R & 0 & 0 \\ 0 & r_R & 0 \\ 0 & 0 & r_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{RA}(p) \\ I_{RB}(p) \\ I_{RC}(p) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Система уравнений потокосцеплений контуров статора имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{SA}(t) = L_S i_{SA}(t) + M_{S_{SB}} i_{SB}(t) + M_{S_{SC}} i_{SC}(t) + M_{AAR} i_{RA}(t) + M_{ABR} i_{RB}(t) + M_{ACR} i_{RC}(t); \\ \psi_{SB}(t) = M_{S_{SA}} i_{SA}(t) + L_S i_{SB}(t) + M_{S_{SC}} i_{SC}(t) + M_{BAR} i_{RA}(t) + M_{BBR} i_{RB}(t) + M_{BCR} i_{RC}(t); \\ \psi_{SC}(t) = M_{S_{SA}} i_{SA}(t) + M_{S_{SB}} i_{SB}(t) + L_S i_{SC}(t) + M_{CAR} i_{RA}(t) + M_{CBR} i_{RB}(t) + M_{CCR} i_{RC}(t), \end{cases} \quad (7)$$

где L_S – индуктивность фазы обмотки статора асинхронного двигателя; M_{AAR} , M_{ABR} , M_{ACR} , M_{BBR} , M_{BCR} , M_{CCR} , M_{BAR} , M_{CBR} , M_{CAR} – взаимные индуктивности обмоток статора и ротора асинхронного двигателя; M_S – взаимные индуктивности фаз обмотки статора.

Применяя к системе уравнений (7) преобразование Лапласа, получаем

$$\begin{cases} \Psi_{SA}(p) = L_S I_{SA}(p) + M_S I_{SB}(p) + M_S I_{SC}(p) + M_{AAR} I_{RA}(p) + M_{ABR} I_{RB}(p) + M_{ACR} I_{RC}(p); \\ \Psi_{SB}(p) = M_S I_{SA}(p) + L_S I_{SB}(p) + M_S I_{SC}(p) + M_{BAR} I_{RA}(p) + M_{BBR} I_{RB}(p) + M_{BCR} I_{RC}(p); \\ \Psi_{SC}(p) = M_S I_{SA}(p) + M_S I_{SB}(p) + L_S I_{SC}(p) + M_{CAR} I_{RA}(p) + M_{CBR} I_{RB}(p) + M_{CCR} I_{RC}(p). \end{cases} \quad (8)$$

В матричной форме система уравнений (8) запишется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{SA}(p) \\ \Psi_{SB}(p) \\ \Psi_{SC}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{SA}(p) \\ I_{SB}(p) \\ I_{SC}(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{AAR} & M_{ABR} & M_{ACR} \\ M_{BAR} & M_{BBR} & M_{BCR} \\ M_{CAR} & M_{CBR} & M_{CCR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{RA}(p) \\ I_{RB}(p) \\ I_{RC}(p) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Система уравнений потокосцеплений контуров ротора имеет вид

$$\begin{cases} \Psi_{RA}(t) = M_{AAR} i_{SA}(t) + M_{BAR} i_{SB}(t) + M_{CAR} i_{SC}(t) + L_R i_{RA}(t) + M_R i_{RB}(t) + M_R i_{RC}(t); \\ \Psi_{RB}(t) = M_{ABR} i_{SA}(t) + M_{BBR} i_{SB}(t) + M_{CBR} i_{SC}(t) + M_R i_{RA}(t) + L_R i_{RB}(t) + M_R i_{RC}(t); \\ \Psi_{RC}(t) = M_{ACR} i_{SA}(t) + M_{BCR} i_{SB}(t) + M_{CCR} i_{SC}(t) + M_R i_{RA}(t) + M_R i_{RB}(t) + L_R i_{RC}(t), \end{cases} \quad (10)$$

где L_R – индуктивность фазы обмотки ротора; M_R – взаимные индуктивности фаз обмотки ротора.

Применяя к системе уравнений (10) преобразование Лапласа, получаем

$$\begin{cases} \Psi_{RA}(p) = M_{AAR} I_{SA}(p) + M_{BAR} I_{SB}(p) + M_{CAR} I_{SC}(p) + L_R I_{RA}(p) + M_R I_{RB}(p) + M_R I_{RC}(p); \\ \Psi_{RB}(p) = M_{ABR} I_{SA}(p) + M_{BBR} I_{SB}(p) + M_{CBR} I_{SC}(p) + M_R I_{RA}(p) + L_R I_{RB}(p) + M_R I_{RC}(p); \\ \Psi_{RC}(p) = M_{ACR} I_{SA}(p) + M_{BCR} I_{SB}(p) + M_{CCR} I_{SC}(p) + M_R I_{RA}(p) + M_R I_{RB}(p) + L_R I_{RC}(p). \end{cases} \quad (11)$$

В матричной форме система уравнений (11) запишется в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{RA}(p) \\ \Psi_{RB}(p) \\ \Psi_{RC}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{AAR} & M_{BAR} & M_{CAR} \\ M_{ABR} & M_{BBR} & M_{CBR} \\ M_{ACR} & M_{BCR} & M_{CCR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{SA}(p) \\ I_{SB}(p) \\ I_{SC}(p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_R & M_R & M_R \\ M_R & L_R & M_R \\ M_R & M_R & L_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{RA}(p) \\ I_{RB}(p) \\ I_{RC}(p) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Таким образом, математическую модель асинхронного двигателя можно описать следующей системой матричных уравнений:

$$\begin{cases} [u_{SM}] = p[\Psi_{SM}] + [r_{SM}] \cdot [i_{SM}]; \\ 0 = p[\Psi_{RM}] + [r_{RM}] \cdot [i_{RM}]; \\ [\Psi_{SM}] = [L_{SSM}] \cdot [i_{SM}] + [L_{SRM}] \cdot [i_{RM}]; \\ [\Psi_{RM}] = [L_{RSM}] \cdot [i_{SM}] + [L_{RRM}] \cdot [i_{RM}], \end{cases} \quad (13)$$

где

$$[u_{SM}] = \begin{bmatrix} U_{SA}(p) \\ U_{SB}(p) \\ U_{SC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец фазных напряжений обмотки статора асинхронного}$$

двигателя, выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[u_{RM}] = \begin{bmatrix} U_{RA}(p) \\ U_{RB}(p) \\ U_{RC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец фазных напряжений обмотки ротора асинхронного}$$

двигателя, выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[\Psi_{SM}] = \begin{bmatrix} \Psi_{SA}(p) \\ \Psi_{SB}(p) \\ \Psi_{SC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец потокосцеплений фаз обмотки статора асинхронного}$$

двигателя, выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[\Psi_{RM}] = \begin{bmatrix} \Psi_{RA}(p) \\ \Psi_{RB}(p) \\ \Psi_{RC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец потокосцеплений фаз ротора асинхронного двигате-}$$

ля, выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[i_{SM}] = \begin{bmatrix} I_{SA}(p) \\ I_{SB}(p) \\ I_{SC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец токов фаз обмотки статора асинхронного двигателя,}$$

выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[i_{RM}] = \begin{bmatrix} I_{RA}(p) \\ I_{RB}(p) \\ I_{RC}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец токов фаз обмотки ротора асинхронного двигателя,}$$

выраженных в преобразовании Лапласа;

$$[r_{SM}] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \text{ – матрица активных сопротивлений фаз обмотки статора;}$$

$$[r_{RM}] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \text{ – матрица активных сопротивлений обмотки ротора;}$$

$$[L_{SSM}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ – матрица индуктивностей обмотки статора;}$$

$$[L_{SRM}] = \begin{bmatrix} M_{AAR} & M_{ABR} & M_{ACR} \\ M_{BAR} & M_{BBR} & M_{BCR} \\ M_{CAR} & M_{CBR} & M_{CCR} \end{bmatrix} \text{ – матрица взаимных индуктивностей обмотки статора с}$$

обмоткой ротора;

$$[L_{RSM}] = [L_{SRM}]^T = \begin{bmatrix} M_{AAR} & M_{BAR} & M_{CAR} \\ M_{ABR} & M_{BBR} & M_{CBR} \\ M_{ACR} & M_{BCR} & M_{CCR} \end{bmatrix} - \text{матрица взаимных индуктивностей обмотки}$$

ротора и обмотки статора;

$$[L_{RRM}] = \begin{bmatrix} L_R & M_R & M_R \\ M_R & L_R & M_R \\ M_R & M_R & L_R \end{bmatrix} - \text{матрица индуктивностей обмотки ротора.}$$

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сопоставим уравнения обмоток статора и контуров ротора асинхронного двигателя (1), (2) электрические схемы замещения (рис. 2).

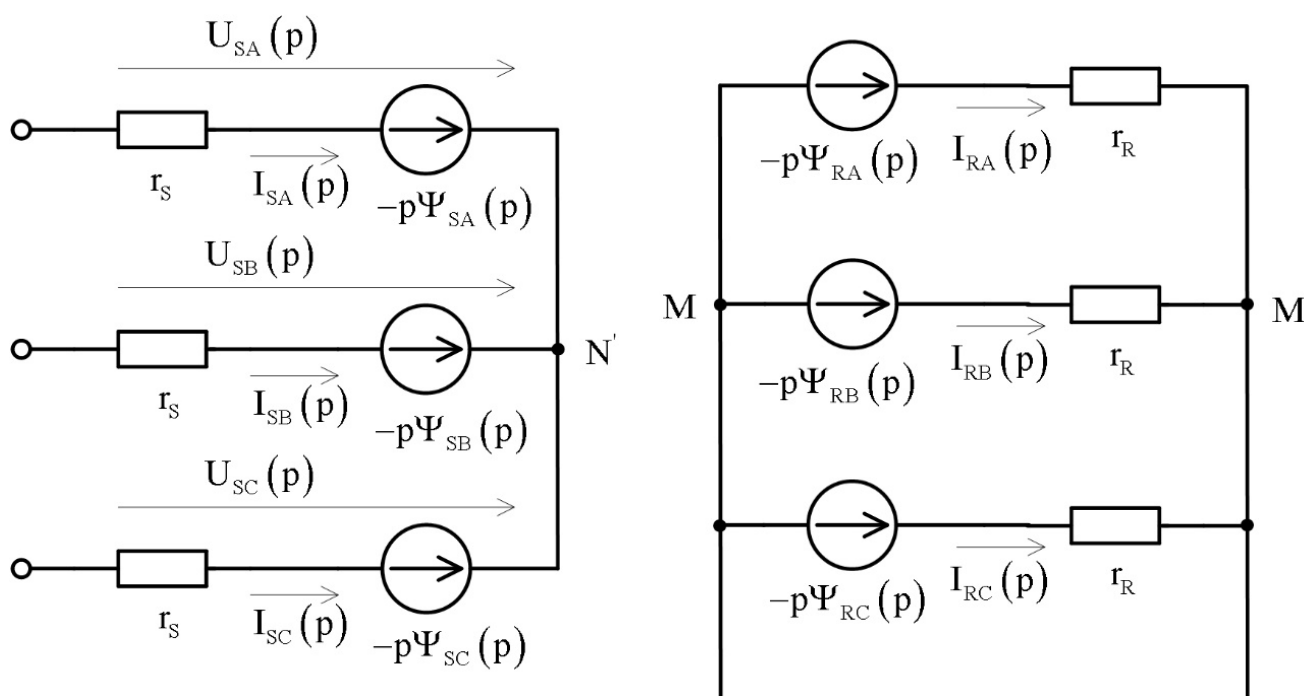


Рис. 2. Схема замещения обмоток статора и ротора асинхронного двигателя в операторной форме
Fig. 2. Equivalent circuit the stator windings and rotor of the induction motor in the operator form

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ОБМОТКИ СТАТОРА И КОНТУРОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Определим величины токов обмоток статора и ротора асинхронного двигателя. Имеем систему матричных уравнений асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} [u_{SM}] = p[\Psi_{SM}] + [r_{SM}] \cdot [i_{SM}]; \\ 0 = p[\Psi_{RM}] + [r_{RM}] \cdot [i_{RM}]; \\ [\Psi_{SM}] = [L_{SSM}] \cdot [i_{SM}] + [L_{SRM}] \cdot [i_{RM}]; \\ [\Psi_{RM}] = [L_{RSM}] \cdot [i_{SM}] + [L_{RRM}] \cdot [i_{RM}]. \end{cases} \quad (14)$$

Решая систему уравнений (14), получим значения токов $[i_{SM}]$, $[i_{RM}]$.

$$[i_{SM}] = [J]^{-1} \cdot [u_{SM}], \quad (15)$$

$$[i_{RM}] = -[G]^{-1} \cdot [L_{RSM}] \cdot [i_{SM}] = -[G]^{-1} \cdot [L_{RSM}] \cdot [J]^{-1} \cdot [u_{SM}], \quad (16)$$

где $[G] = [L_{RRM}] + \frac{1}{p} \cdot [r_{RM}]$, $[H] = [L_{SSM}] - [L_{SRM}] \cdot [G]^{-1} \cdot [L_{RSM}]$, $[J] = p[H] + [r_{SM}]$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Математическая модель механической части описывается уравнением, учитывающим динамику вращательного движения ротора асинхронного двигателя [7, 8]:

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = M_{EL}(t) - M_L(t), \quad (17)$$

где J – момент инерции ротора асинхронного двигателя; $\Omega(t)$ – скорость вращения ротора; $M_{EL}(t)$ – электромагнитный момент; $M_L(t)$ – момент сопротивления на валу асинхронного двигателя.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется как

$$M_{EL}(t) = \frac{dW_M(t)}{d\Theta_R(t)}, \quad (18)$$

где $W_M(t)$ – энергия магнитного поля обмоток и контуров асинхронного двигателя;

$\Theta_R(t)$ – угол поворота ротора асинхронного двигателя.

Энергия магнитного поля обмоток и контуров асинхронного двигателя определяется как

$$W_M(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq k}}^n L_{ks} i_k(t) i_s(t), \quad (19)$$

где L_k – индуктивность k -той обмотки (контура) асинхронного двигателя; L_{ks} – взаимная индуктивность между k -той и s -той обмотками асинхронного двигателя; i_k – ток k -той обмотки асинхронного двигателя; i_s – ток s -той обмотки асинхронного двигателя.

Преобразуем выражение (19):

$$W_M(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq k}}^n L_{ks} i_k(t) i_s(t) = \frac{L_S i_{SA}^2(t)}{2} + \frac{L_S i_{SB}^2(t)}{2} + \frac{L_S i_{SC}^2(t)}{2} + \frac{L_R i_{RA}^2(t)}{2} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{L_R i_{RB}^2(t)}{2} + \frac{L_R i_{RC}^2(t)}{2} + \frac{M_S i_{SA}(t) i_{SB}(t)}{2} + \frac{M_S i_{SB}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_S i_{SA}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_S i_{SA}(t) i_{SB}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_S i_{SB}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_S i_{SA}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_R i_{RA}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_R i_{RB}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_R i_{RA}(t) i_{RC}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_R i_{RA}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_R i_{RB}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_R i_{RA}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_{AAR} i_{SA}(t) i_{RA}(t)}{2} + \frac{M_{AAR} i_{SA}(t) i_{RA}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_{ABR} i_{SA}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_{ACR} i_{SA}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_{ABR} i_{RA}(t) i_{SB}(t)}{2} + \frac{M_{ACR} i_{RA}(t) i_{SC}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_{BAR} i_{RA}(t) i_{SB}(t)}{2} + \frac{M_{BAR} i_{SA}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_{BBR} i_{SB}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_{BBR} i_{SB}(t) i_{RB}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_{CAR} i_{RA}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_{BCR} i_{SB}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_{BCR} i_{RB}(t) i_{SC}(t)}{2} + \frac{M_{CAR} i_{SC}(t) i_{RA}(t)}{2} + \\
 & + \frac{M_{CBR} i_{SC}(t) i_{RB}(t)}{2} + \frac{M_{CCR} i_{SC}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_{CBR} i_{SB}(t) i_{RC}(t)}{2} + \frac{M_{CCR} i_{SC}(t) i_{RC}(t)}{2},
 \end{aligned}$$

где $i_{SA}(t)$, $i_{SB}(t)$, $i_{SC}(t)$ – мгновенные значения фазных токов обмотки статора асинхронного двигателя; $i_{RA}(t)$, $i_{RB}(t)$, $i_{RC}(t)$ – мгновенные значения токов обмотки ротора асинхронного двигателя; L_S – индуктивности фаз обмотки статора асинхронного двигателя; M_S – взаимные индуктивности фаз обмотки статора асинхронного двигателя; M_{AAR} , M_{ABR} , M_{ACR} , M_{BAR} , M_{BBR} , M_{BCR} , M_{CAR} , M_{CBR} , M_{CCR} – взаимные индуктивности обмотки статора и обмотки ротора асинхронного двигателя; L_R – индуктивности обмотки ротора асинхронного двигателя; M_R – взаимные индуктивности фаз обмотки ротора асинхронного двигателя.

Момент сопротивления на валу ротора асинхронного двигателя в общем случае может быть представлен в виде суммы трех составляющих:

$$M_L(t) = M_{L1}(t) + M_{L2}(t) + M_{L3}(t) = M_0 + K_{M1} \cdot \Omega(t) + K_{M2} \cdot \Omega^2(t), \quad (20)$$

где $M_{L1}(t) = M_0$ – момент сухого трения, M_0 – постоянная составляющая; $M_{L2}(t) = K_{M1} \cdot \Omega(t)$ – момент вязкого трения, пропорциональный скорости вращения ротора, K_{M1} – коэффициент пропорциональности; $M_{L3}(t) = K_{M2} \cdot \Omega^2(t)$ – «вентиляторный» момент, пропорциональный квадрату скорости вращения ротора, K_{M2} – коэффициент пропорциональности.

Подставляя значение $M_L(t)$ из выражения (20) в уравнение (17), получаем

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = M_{EL}(t) - M_0 - K_{M1} \cdot \Omega(t) - K_{M2} \cdot \Omega^2(t). \quad (21)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. В работе рассмотрено дальнейшее совершенствование математической модели канала генерирования бортовой СЭС переменного тока. Имеющаяся математическая модель канала генерирования бортовой СЭС переменного тока дополнена математической моделью асинхронного двигателя.

2. При получении математической модели асинхронного двигателя были рассмотрены модели электрической и механической частей, что позволяет учитывать взаимосвязь электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих при работе в режиме пуска и в установившемся режиме работы двигателя. Модель электрической части асинхронного двигателя описывает асинхронный двигатель в фазных координатах «АВС», данная модель в отличие от модели в координатах «dq» [8, 9, 10] позволяет описывать процессы как в симметричных, так и в несимметричных режимах.

3. Получение полной математической модели канала СЭС и бортовых потребителей позволит получить полное представление о процессах, происходящих в реальных СЭС, более детально изучить работу СЭС при различных режимах: как нормальных, так и ненормальных, и аварийных. В связи с этим, имея математическую модель СЭС, описывающую поведение реальной СЭС, появляется возможность контролировать поведение СЭС при любом ненормальном режиме, тем самым значительно снижая вероятность возникновения аварийных ситуаций в полете. Как следствие, это приводит к значительному повышению уровня безопасности полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демченко А.Г. Моделирование элементов бортовых систем электроснабжения в программной среде MATLAB // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012»: сборник тезисов докладов. М.: ООО «Принт-салон», 2012. С. 13–14.

2. Артеменко Ю.П., Шарапов С.С. Применение MATLAB в моделировании бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 77–84.

3. Артеменко Ю.П., Демченко А.Г. Моделирование параллельной работы бортовой системы электроснабжения переменного тока в пакете MATLAB // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 55–60.

4. Демченко А.Г. Модель канала бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 201. С. 74–85.

5. Артеменко Ю.П., Демченко А.Г. Совершенствование модели канала бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213. С. 34–42.

6. Мишин С.В., Мишина И.В. Особенности рабочих процессов в электромеханических системах генерирования переменного тока постоянной частоты // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 138–145.

7. Пустоветов М.Ю. Выбор математической модели асинхронного двигателя в трехфазных заторможенных координатах // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. № 4 (48). С. 136–144.

8. Мамиконянц Л.Г. Анализ некоторых аспектов переходных и асинхронных режимов синхронных и асинхронных машин. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2006. 368 с.

9. Гусейнов А.М., Ибрагимов Ф.Ш. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. № 5. С. 10–17.

10. Логачева А.Г., Вафин Ш.И. Математическая модель многофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Электрика. 2015. № 8. С. 27–34.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артеменко Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЭТ и АЭО МГТУ ГА, yu.artemenko@mstuca.aero.

Демченко Алексей Геннадьевич, старший преподаватель кафедры ТЭ АЭС и ПНК МГТУ ГА, demmasterr@yandex.ru.

MODEL OF INDUCTION MOTOR AS A PART OF THE CHANNEL OF ALTERNATE CURRENT OF AIRCRAFT ELECTRICAL POWER-SUPPLY SYSTEM

Artemenko Yu.P.¹, Demchenko A.G.¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

ABSTRACT

Currently, there is an increasing level of electrified equipment of aircraft. This work is performed under the concept of creating a Fully Electric Aircraft (FEA), where the functions of the individual aircraft systems (pneumatic and hydraulic) will be performed by an electrical power system. The result of these procedures will be a significant increase of the electric motor load on board the aircraft. Consequently, it will increase the energy sources power of the power supply system (PSS) of the aircraft. This work is devoted to mathematical modeling of the induction motor. The induction motor with the squirrel-cage rotor is considered. The models of electrical and mechanical parts were considered while obtaining the induction motor mathematical model. It allows considering the relationship of electromagnetic and electromechanical processes in transient and steady-state modes of motor operation. The electrical part model is implemented in the equations for the voltages of windings and flux linkages circuits of the induction motor, which are written in the system of phase coordinates "ABC". When considering the mathematical model of the mechanical part the equation of torques, influencing the induction motor shaft during rotating action was used. The matrix equations system is the mathematical model of the induction motor. As a result of solving those equations the authors have got the formulae for stator winding current phases and squirrel-cage rotor circuits of the induction motor. The obtained mathematical model describes the electromagnetic and electromechanical processes in the induction motor, in a stationary system of phase coordinates "ABC". This model, unlike models in rotating coordinates "dq", describes the processes in symmetric and asymmetric modes, such as phase failures (open-phase modes) and short-circuit phases of the induction motor, while the mathematical model implemented in the system of rotating coordinates "dq", is true only for symmetrical modes of motor operation.

Key words: math modeling, electrical power-supply system, induction motor, three-phase load, alternative current.

REFERENCES

- 1. Demchenko A.G.** *Modelirovaniye elementov bortovykh sistem elektrosnabzheniya v programmnoy srede MATLAB* [Simulated on-Board power supply systems in MATLAB]. *Moskovskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsii v aviatsii i kosmonavtike – 2012»* [Moscow youth scientific-practical conference "Innovations in aviation and cosmonautics – 2012"]. *Sbornik tezisev dokladov* [The book of abstracts]. Moscow, Print-salon Publ., 2012, pp. 13–14. (in Russian)
- 2. Artemenko Yu.P., Scharapov S.S.** *Primenenie MATLAB v modelirovanii bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Application of matlab in simulation of airborne power-supply system alternating-current]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2012, no. 185, pp. 77–84. (in Russian)
- 3. Artemenko Yu.P., Demchenko A.G.** *Modelirovaniye parallel'noy raboty bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka v pakete MATLAB* [Simulation of parallel working of alternate current airborne power-supply system in matlab]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2012, no. 185, pp. 55–60. (in Russian)
- 4. Demchenko A.G.** *Model' kanala bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Model of channel airborn electrical power system]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2014, no. 201, pp. 74–85. (in Russian)
- 5. Artemenko Yu.P., Demchenko A.G.** *Sovershenstvovaniye modeli kanala bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Improving model of channel airborn electrical power system of

alternating current]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2015, no. 213, pp. 34–42. (in Russian)

6. Mishin S.V., Mishina I.V. *Osobennosti rabochnih processov v jelectromehaničeskikh sistemah generirovanija peremennogo toka postojannoj chastoty* [Peculiarities of operational processes of electromechanical generating systems of direct frequency alternating current]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2012, no. 185, pp. 138–145. (in Russian)

7. Pustovetov M.Yu. *Vybor matematicheskoj modeli asinhronnogo dvigatelja v trjohfaznyh zatormozhennyh koordinatah* [Choice of induction motor mathematical model in the 3-phase stator reference frame]. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija* [Bulletin of the Rostov state transport university], 2012, no. 4 (48), pp. 136–144. (in Russian)

8. Mamikonjanc L.G. *Analiz nekotoryh aspektov perehodnyh i asinhronnyh rezhimov sinhronnyh i asinhronnyh mashin* [Analysis of some aspects of the transient and asynchronous modes the synchronous and asynchronous machines]. Moscow, JeLEKS-KM Publ., 2006, 368 p. (in Russian)

9. Gusejnov A.M., Ibragimov F.Sh. *Raschet v faznyh koordinatah nesimmetričnyh ustanovivshijsja i perehodnyh rezhimov v slozhnyh jelectrojenergetičeskikh sistemah* [The calculation of the phase coordinates of the unbalanced steady-state and transients in complex power systems]. *Jelektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 5, pp. 10–17. (in Russian)

10. Logachjova A.G., Vafin Sh.I. *Matematicheskaja model mnogofaznogo asinhronnogo dvigatelja s korotkozamknutym rotorom* [Mathematical model of a multiphase induction motor with squirrel cage rotor]. *Jelektrika* [Electrics], 2015, no. 8, pp. 27–34. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artemenko Yurij Petrovich, PhD, Associate Professor, Head of Chair of Electrical Engineering and Aircraft Electrical Systems, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.artemenko@mstuca.aero.

Demchenko Aleksej Gennad'evich, Assistant Professor of Chair of Aircraft Electrical Systems and Avionics Technical Operation of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, demmasterr@yandex.ru.