ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
LXIII 1976 2

УДК 621.313.30

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Академик АН Армянской ССР А. Г. Иосифьян, Г. Л. Арешян

Теория синхронно-асинхронной машины с дуальной системой возбуждения

(Представлено 6/IV 1976)

Рассматриваемая машина состоит из трех электромагнитных систем (рис. 1). Две системы S и R имеют симметричные трехфазные обмотки, фазы которых обозначены через a, b, c и n, m, h. Третья система F, пространственно расположенная между системами S и R, является источником постоянного магнитного поля возбуждения, дуально связанного с обмотками систем S и R. Возбуждение может быть осуществлено либо с помощью постоянных магнитов с высокими удельными энергетическими характеристиками, либо

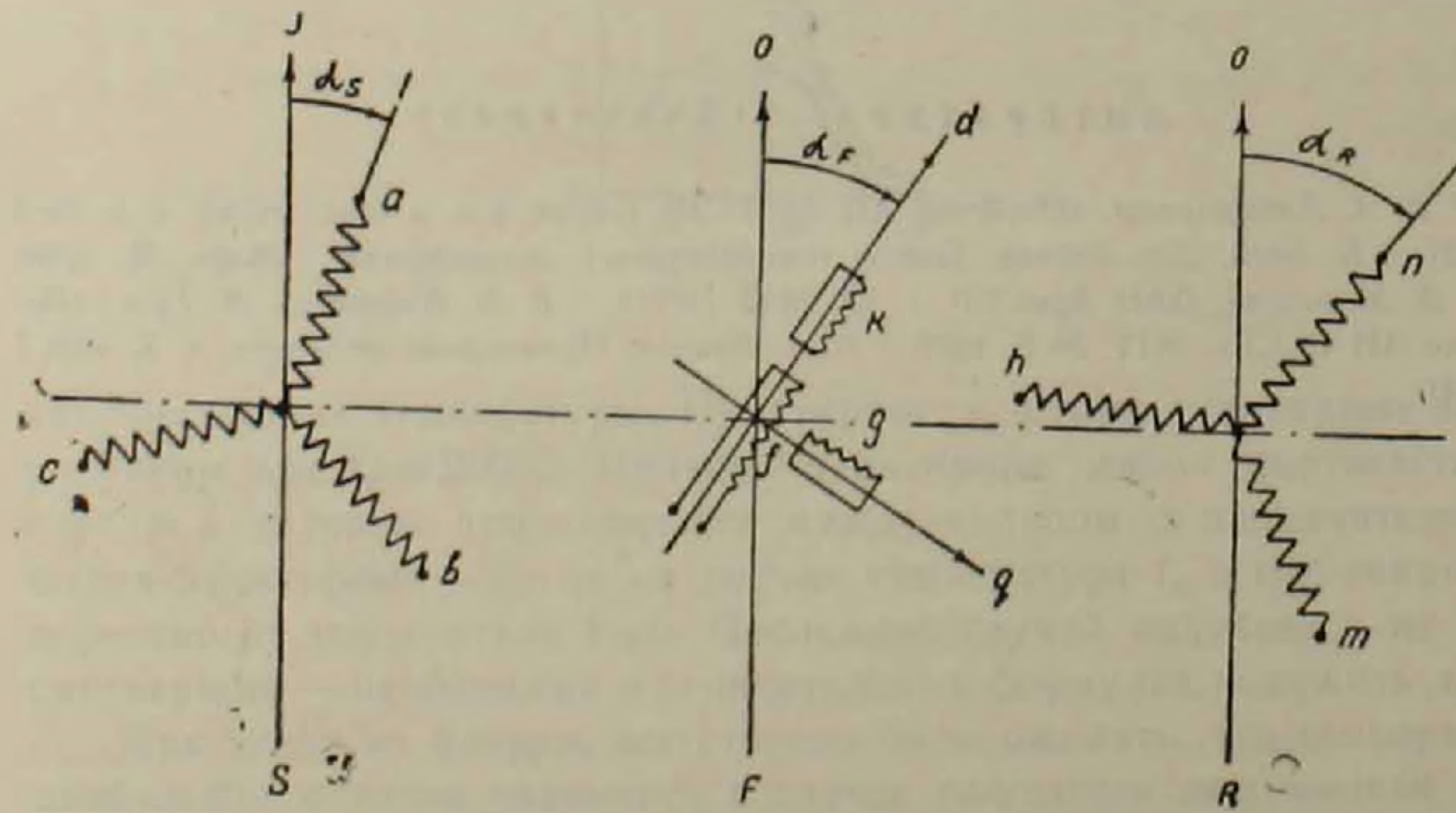

Рис. 1. Схема обмоток и их обозначения синхронно-асинхронной машины с дуальной системой возбуждения

с помощью обмотки возбуждения f, питаемой постоянным током. Система F имеет также две демпфирующие обмотки k и g. Магнитные оси обмоток f и k совпадают с продольной осью d, а магнитная ось обмотки g—с поперечной осью q. Конструктивно эти три системы S, F и R могут быть выполнены в виде дисковых или цилиндрических синхронно-асинхронных машин. В общем случае, каждая система S, F и R может иметь одну степень свободы пространственного поворота относительно некоторой неподвижной системы отсчета и определяемая углами α_S, α_F и α_R между системой отсчета и осями обмоток a (система S), f (система F) и n (система R). Углы α_S α_F и α_R — выражаются в электрических градусах. Положение систем F и R относительно системы S будем определять углами: $\Theta=\alpha_F-\alpha_S$ и $\alpha=\alpha_R-\alpha_S$. Угол между системами F и R обозначим через $\beta=\alpha-\Theta=\alpha_R-\alpha_F$. Динамические процессы, происходящие в рассматриваемой машине, описываются нижеследующими дифференциальными уравнениями мгновенных значений напряжений, токов и магнитных потокосцеплений:

система S (1.1)

$$u_a=\frac{d\psi_a}{dt}+r_s i_a; \qquad u_b=\frac{d\psi_b}{dt}+r_s i_b; \qquad u_c=\frac{d\psi_c}{dt}+r_s i_c;$$

система F (1.2)

$$u_f=\frac{d\psi_f}{dt}+r_f i_f; \qquad 0=\frac{d\psi_k}{dt}+r_k i_k; \qquad 0=\frac{d\psi_g}{dt}+r_g i_g;$$

система R (1.3)

$$u_n=\frac{d\psi_n}{dt}+r_R i_n; \qquad u_m=\frac{d\psi_m}{dt}+r_R i_m; \qquad u_h=\frac{d\psi_h}{dt}+r_R i_h$$

и дифференциальными уравнениями движения инерциальных масс

$$J_S\frac{d^2\alpha_S}{pdt^2}+k_S\frac{d\alpha_S}{pdt}+M_{S\text{эм}}=M_{S\text{вн}}, \tag{2.1}$$

$$J_F\frac{d^2\alpha_F}{pdt^2}+k_F\frac{d\alpha_F}{pdt}+M_{F\text{эм}}=M_{F\text{вн}}, \tag{2.2}$$

$$J_R\frac{d^2\alpha_R}{pdt^2}+K_R\frac{d\alpha_R}{pdt}+M_{R\text{эм}}=M_{R\text{вн}}. \tag{2.3}$$

В уравнениях (2) J_l—момент инерции, $M_{l\text{эм}}$—электромагнитные моменты систем ($l=S,\ F,\ R$);
$M_{l\text{вн}}$—внешние моменты соответствующих систем;
p—число пар полюсов машины.

Система уравнений баланса напряжений (1) и баланса вращающих моментов с учетом движения инерциальных масс (2) описывают, в общем случае стационарные и не стационарные режимы взаимосвязанных электромагнитных систем S, F и R. С точки зрения преобразования энергии, в принципе, например, могут быть реализованы следующие случаи:

1. Электромагнитная энергия подводится в систему S, система F возбуждена постоянным током; система обмоток R закорочена. Тогда: система SF работает в режиме синхронного двигателя (с отбором либо без отбора механической энергии из системы F); система FR работает в режиме асинхронного двигателя. Обобщенные координаты при этом равны $\alpha_S = \text{const}$; $\alpha_F(t)$; $\alpha_R(t)$.
2. Электромагнитная энергия подводится в систему R, $\alpha_R = \text{const}$; обмотки системы S закорочены; система F возбуждена. Тогда: SF—работает в режиме асинхронного, а FR—в режиме синхронного, двигателя.
3. Механическая энергия подводится к системе F и она возбуждена постоянным током ($\alpha_F(t)$); Системы S и R работают в режимах синхронных генераторов ($\alpha_S = \text{const}$, $\alpha_R = \text{const}$) либо в режимах асинхронных двигателей ($\alpha_S(t)$ и $\alpha_R(t)$ либо одна система в режиме синхронного генератора, а другая в режиме асинхронного двигателя.
4. Система F возбуждена и закреплена ($\alpha_F = \text{const}$); к системам S и R подводится механическая энергия. Системы S и R работает в режиме синхронных генераторов.
5. Тоже, что и случай 4, но механическая энергия подводится к системе S и она работает в режиме синхронного генератора а из системы R отводится механическая энергия и она работает в режиме асинхронного двигателя.

Возможны также и другие случаи.

Специфические особенности этих всех возможных энергетических преобразований отражены в дифференциальных уравнениях (1) и (2) и анализируются путем задания соответствующих напряжений, величин внешних моментов и их знаков, а также наложением необходимых ограничений на пространственные обобщенные координаты.

Потокосцепления, выраженные в матричной форме, определяются через индуктивности и токи выражениями:

$$\left.\begin{aligned} \psi_S &= L_{SS} i_S + L_{SF} i_F + L_{SR} i_R, \\ \psi_F &= L_{FS} i_S + L_{FF} i_F + L_{FR} i_R, \\ \psi_R &= L_{RS} i_S + L_{RF} i_F + L_{RR} i_R, \end{aligned}\right| \tag{3}$$

где $\psi_S = (\psi_a\, \psi_b\, \psi_c)$, $\psi_F = (\psi_f\, \psi_k\, \psi_g)$, $\psi_R = (\psi_n\, \psi_m\, \psi_h)$ — столбцовые матрицы потокосцеплений; $i_S = (i_a\, i_b\, i_c)$; $i_F = (i_f\, i_k\, i_g)$, $i_R = (i_n\, i_m\, i_h)$, — столбцовые матрицы токов. Матрицы индуктивностей имеют вид (через ρ обозначен угол 120°):

$$L_{SS} = \begin{Vmatrix} L_S & -M_S & -M_S \\ -M_S & L_S & -M_S \\ -M_S & -M_S & L_R \end{Vmatrix}; \quad L_{SF} =$$

$$= \begin{Vmatrix} M_{Sf}\cos\Theta & M_{Sk}\cos\Theta & -M_{Sg}\sin\Theta \\ M_{Sf}\cos(\Theta-\rho) & M_{Sk}\cos(\Theta-\rho) & -M_{Sg}\sin(\Theta-\rho) \\ M_{Sf}\cos(\Theta+\rho) & M_{Sk}\cos(\Theta+\rho) & -M_{Sg}\sin(\Theta+\rho) \end{Vmatrix}; \tag{4}$$

$$L_{SR}=M_{SR}\begin{Vmatrix}\cos\alpha & \cos(\alpha+\rho) & \cos(\alpha-\rho)\\ \cos(\alpha-\rho) & \cos\alpha & \cos(\alpha+\rho)\\ \cos(\alpha+\rho) & \cos(\alpha-\rho) & \cos\alpha\end{Vmatrix};\quad L_{FS}=L^{\tau}_{SF}; \tag{4}$$

$$L_{FF}=\begin{Vmatrix}L_f & M_{fk} & 0\\ M_{fk} & L_k & 0\\ 0 & 0 & L_g\end{Vmatrix};\quad L_{FR}=\begin{Vmatrix}M_{Rf}\cos\beta & M_{Rf}\cos(\beta+\rho) & M_{Rf}\cos(\beta-\rho)\\ M_{Rk}\cos\beta & M_{Rk}\cos(\beta+\rho) & M_{Rk}\cos(\beta-\rho)\\ M_{Rg}\sin\beta & M_{Rg}\sin(\beta+\rho) & M_{Rg}\sin(\beta-\rho)\end{Vmatrix}$$

$$L_{RS}=L^{\tau}_{SR};\quad L_{RF}=L^{\tau}_{FR};\quad L_{RR}\begin{Vmatrix}L_R & -M_R & -M_R\\ -M_R & L_R & -M_R\\ -M_R & -M_R & L_R\end{Vmatrix}$$

Верхним индексом „τ“ обозначена транспортированная матрица. Индуктивности выписаны для случая симметричного магнитопровода, относительно осей „d“ и „q“. В дальнейшем через R_S R_F и R_R обозначены матрицы активных сопротивлений соответствующих систем:

$$R_S=\begin{Vmatrix}r_S & 0 & 0\\ 0 & r_S & 0\\ 0 & 0 & r_S\end{Vmatrix};\quad R_F=\begin{Vmatrix}r_f & 0 & 0\\ 0 & r_k & 0\\ 0 & 0 & r_g\end{Vmatrix};\quad R_R=\begin{Vmatrix}r_R & 0 & 0\\ 0 & r_R & 0\\ 0 & 0 & r_R\end{Vmatrix} \tag{5}$$

Выражения для электромагнитных моментов, приложенных к системам: $M_{S\,эм}$ $M_{F\,эм}$ $M_{R\,эм}$ (см. уравнения (2)), определяются из выражений:

$$M_{S\,эм}=-p\,\frac{\partial T_э}{\partial\alpha_S};\quad M_{F\,эм}=-p\,\frac{\partial T_э}{\partial\alpha_F};\quad M_{R\,эм}=-p\,\frac{\partial T_э}{\partial\alpha_R}, \tag{6}$$

где $T_э$ — электромагнитная энергия машины, равная;

$$T_э=\frac{1}{2}\,[i^{\tau}_S\ i^{\tau}_F\ i^{\tau}_R]\begin{bmatrix}L_{SS}L_{SF}L_{SR}\\ L_{FS}L_{FF}L_{FR}\\ L_{RS}L_{RF}L_{RR}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}i_S\\ i_F\\ i_R\end{bmatrix}=\frac{1}{2}\,i^{\tau}L\,i, \tag{7}$$

где L и i — блочные матрицы. С учетом (7), выражения (6) примут вид:

$$M_{S\,эм}=-\frac{p}{2}\,i^{\tau}\frac{\partial L}{\partial\alpha_S}i;\quad M_{F\,эм}=-\frac{p}{2}\,i^{\tau}\frac{\partial L}{\partial\alpha_F}i;\quad M_{R\,эм}=-\frac{p}{2}\,i^{\tau}\frac{\partial L}{\partial\alpha_R}i. \tag{8}$$

Уравнения (8) справедливы для случая движения всех трех систем S, F и R относительно неподвижной системы отсчета: При этом $\alpha_S p^{-1}$, $\alpha_F p^{-1}$, $\alpha_R p^{-1}$ являются независимыми обобщенными координатами и все элементы матриц L_{ij} уравнений (4) должны быть выражены через эти углы, после чего вычисленны частные производные уравнения (8). В случае закрепления системы S, в качестве независимых обобщенных координат, целесообразно принять углы $\Theta p^{-1}=p^{-1}\int_0^t\omega_f\,dt+p^{-1}\Theta_0$ и $\alpha p^{-1}=p^{-1}\int_0^t\omega_R dt+p^{-1}\alpha_0$, тогда элементы матриц L_{ij} выражаются через эти углы и вместо (2) и (8) имеем:

$$\left.\begin{aligned} J_F \frac{d^2\Theta}{pdt^2} + k_F \frac{d\Theta}{pdt} + M_{F\text{эм}} = M_{F\text{вн}} \\ J_R \frac{d^2\alpha}{pdt^2} + k_R \frac{d\alpha}{pdt} + M_{R\text{эм}} = M_{R\text{вн}} \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

и соответственно:

$$M_{F\text{эм}} = -\frac{p}{2} i^t \frac{\partial L}{\partial \Theta} i, \qquad M_{R\text{эм}} = -\frac{p}{2} i^t \frac{\partial L}{\partial \alpha} i. \quad (10)$$

Величина электромагнитного момента, действующая на опору (систему S), в этом случае будет равна:

$$M_{S\text{эм}} = M_{F\text{эм}} + M_{R\text{эм}}. \quad (11)$$

Все полученные выше дифференциальные уравнения содержат коэффициенты, которые являются периодическими функциями времени. Известны методы преобразования систем дифференциальных уравнений синхронной машины ([1]) и асинхронной машины ([2]) в пространство с новыми переменными, где коэффициенты систем дифференциальных уравнений оказываются постоянными величинами.

Можно показать, что матрицы индуктивностей и активных сопротивлений рассматриваемой синхронно-асинхронной машины с дуальной системой возбуждения

$$L = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SF} & L_{SR} \\ L_{FS} & L_{FF} & L_{FR} \\ L_{RS} & L_{RF} & L_{RR} \end{bmatrix} \qquad R = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_F & 0 \\ 0 & 0 & R_R \end{bmatrix} \quad (12)$$

удовлетворяют требованиям для преобразования системы дифференциальных уравнений в обобщенное пространство Горева-Парка ([3]).

Авторы определили полную матрицу Ляпунова Л с помощью которой, система дифференциальных уравнений рассматриваемой машины преобразовывается в обобщенное пространство Горева-Парка.

$$\left.\begin{aligned} &Л = \begin{bmatrix} Л_S & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & Л_R \end{bmatrix}; \quad Л_S = \left\| \begin{matrix} 1 & \cos\Theta & -\sin\Theta \\ 1 & \cos(\Theta-\rho) & -\sin(\Theta-\rho) \\ 1 & \cos(\Theta+\rho) & -\sin(\Theta+\rho) \end{matrix} \right\| \\ &Л_R = \left\| \begin{matrix} 1 & \cos\beta & \sin\beta \\ 1 & \cos(\beta+\rho) & \sin(\beta+\rho) \\ 1 & \cos(\beta-\rho) & \sin(\beta-\rho) \end{matrix} \right\| \qquad E = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

Новыми переменными напряжений, потокосцеплений и токов для систем S и R будут:

$$u_S^* = Л_S^{-1} u_S; \quad u_R^* = Л_R^{-1} u_R; \quad \psi_S^* = Л_S^{-1} \psi_S; \quad \psi_R^* = Л_R^{-1} \psi_R;$$

$$i_S^* = Л_S^{-1} i_S; \quad i_R^* = Л_R^{-1} i_R; \quad (14)$$

Для системы F новые переменные совпадают с исходными ($Л_F = E$ — единичная матрица). В уравнениях (14) через строчные матрицы обозначены

$$u^{*}_{S} = (u_{S0}\, u_{Sd}\, u_{Sq}) \quad \psi^{*}_{S} = (\psi_{S0}\, \psi_{Sd}\, \psi_{Sq}) \quad i^{*}_{S} = (i_{S0}\, i_{Sd}\, i_{Sq})$$

$$u^{*}_{R} = (u_{R0}\, u_{Rd}\, u_{Rq}) \quad \psi^{*}_{R} = (\psi_{R0}\, \psi_{Rd}\, \psi_{Rq}) \quad i^{*}_{R} = (i_{R0}\, i_{Rd}\, i_{Rq}) \qquad (15)$$

После проведения необходимых вычислений получена нижеследующая преобразованная система дифференциальных уравнений синхронно-асинхронной машины с дуальной системой возбуждения (для электрических контуров):

$$u^{*}_{S} = L^{*}_{SS}\frac{di^{*}_{S}}{dt} + L^{*}_{SF}\frac{di_{F}}{dt} + L^{*}_{SR}\frac{di^{*}_{R}}{dt} + R_S i^{*}_{S} + C_S (L^{*}_{SS} i_S + L^{*}_{SF} i_F + L^{*}_{SR} i^{*}_{R})\frac{d\Theta}{dt},$$

$$u_F = L^{*}_{FS}\frac{di^{*}_{S}}{dt} + L_{FF}\frac{di_F}{dt} + L^{*}_{FR}\frac{di^{*}_{R}}{dt} + R_F i_F \qquad (16)$$

$$u^{*}_{R} = L^{*}_{RS}\frac{di^{*}_{S}}{dt} + L^{*}_{RF}\frac{di_F}{dt} + L^{*}_{RR}\frac{di^{*}_{R}}{dt} + R_R i^{*}_{R} + C_R (L^{*}_{RS} i^{*}_{S} + L^{*}_{RF} i_F + L^{*}_{RR} i^{*}_{R})\frac{d\beta}{dt},$$

где матрицы равны:

$$L^{*}_{SS} = \begin{Vmatrix} L_{S0} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Sc} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Sc} \end{Vmatrix}, \quad L_{S0} = L_S - 2M_S, \quad L_{Sc} = L_S + M_S,$$

$$L^{*}_{SF} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ M_{Sf} & M_{Sk} & 0 \\ 0 & 0 & M_{Sg} \end{Vmatrix}, \quad L^{*}_{SR} = \frac{2}{3} M_{SR} \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}, \quad L^{*}_{FS} = L^{*t}_{SF},$$

$$L_{FF} = \begin{Vmatrix} L_f & M_{fk} & 0 \\ M_{fk} & L_k & 0 \\ 0 & 0 & L_g \end{Vmatrix}, \quad L^{*}_{FR} = \frac{3}{2} \begin{Vmatrix} 0 & M_{kf} & 0 \\ 0 & M_{Rk} & 0 \\ 0 & 0 & M_{Rg} \end{Vmatrix}, \quad L^{*}_{RS} = L^{*t}_{SR}, \qquad (17)$$

$$L^{*}_{RF} = L^{*t}_{FR}, \quad L^{*}_{RR} = \begin{Vmatrix} L_{R0} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Rc} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Rc} \end{Vmatrix} \quad L_{R0} = L_R - 2M_R, \quad L_{Rc} = L_R + M_R$$

$$C_S = Л_S^{-1}\frac{dЛ_S}{d\Theta} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix}, \quad C_R = Л_R^{-1}\frac{dЛ_R}{d\beta} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{Vmatrix}$$

Выражения для потокосцеплений имеют вид:

$$\psi^{*}_{S} = L^{*}_{SS} i^{*}_{S} + L^{*}_{SF} i_F + L^{*}_{SR} i^{*}_{R}$$

$$\psi^{*}_{F} = L^{*}_{FS} i^{*}_{S} + L_{FF} i_F + L^{*}_{FR} i^{*}_{R}$$

$$\psi^{*}_{R} = L^{*}_{RS} i^{*}_{S} + L^{*}_{RF} i_F + L^{*}_{RR} i^{*}_{R}. \qquad (18)$$

В стационарном режиме работы

$$\frac{d\Theta}{dt}=\omega_F=\text{const}\qquad\frac{d\beta}{dt}=\frac{d(\alpha-\Theta)}{dt}=\omega_{z}-\omega_F=\text{const}\tag{19}$$

и система (16) имеет постоянные коэффициенты. Дифференциальные уравнения движения инерциальных масс (9) остаются без изменений, а выражения для электромагнитных моментов (10), после преобразования получают следующий окончательный вид:

$$M_{F\text{эм}}=-3/2\,p(M_{Sf}i_{Sq}i_f+M_{Sk}i_{Sq}i_k-M_{Sq}i_{Sd}i_g-$$
$$-M_{Rg}i_g\,i_{Rd}+M_{Rf}i_f\,i_q+M_{Rk}\,i_k\,i_{Rq})$$
$$M_{K\text{эм}}=3/2\,p(3/2M_{SR}(i_{Sq}i_{Rd}-i_{Sd}i_{Rq})+M_{Fg}\,i_g\,i_{Rd}-$$
$$-M_{Rf}\,i_f\,i_{Rq}-M_{Rk}i_k\,i_{Rq})\tag{20}$$

Откуда на основании (11) определяется

$$M_{S\text{эм}}=-3/2\,p(3/2\,M_{SR}(i_{Sq}\,i_{Rd}-i_{Sd}i_{Rq})+M_{Sf}i_{Sq}i_f+$$
$$+M_{Sk}i_{Sq}i_k-M_{Sg}i_{Sd}i_g).\tag{21}$$

Системы уравнений (9), (16) и (20) являются полными и позволяют исследовать переходные и установившиеся процессы синхронно-асинхронной машины с дуальной системой возбуждения, если заданы внешние напряжения $u_S(t)$, $u_F(t)$, $u^*_R(t)$ и внешние моменты $M_{F\text{вн}}(t)$ и $M_{R\text{вн}}(t)$.

Ереванский политехнический институт им. К. Маркса

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ ակադեմիկոս Ա. Գ. ԻՈՍԻՖՅԱՆ, Գ. Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ

Երկկողմանի (դուալ) գրգռման սիստեմով սինխրոն-ասինխրոն մեքենայի տեսությունը

Զարգացված է էլեկտրական մեքենայի տեսությունը, որը բաղկացած է երեք էլեկտրամագնիսական կապված S, F և R սիստեմներից։ Այդ էլեկտրական մեքենան տալիս է հնարավորություն իրագործել տարբեր գեներատորաշարժիչային ռեժիմներ և մասնավոր դեպքերում այն վերափոխում է սինխրոն (երբ անջատվում է R սիստեմը), կամ ասինխրոն (երբ անջատվում է F սիստեմը) մեքենայի։

Ստացված են դիֆերենցիալ հավասարումների սիստեմներ ինչպես բնական փոփոխականների, այնպես էլ ընդհանրացված տարածության մեջ ձևափոխված փոփոխականների համար։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *А. Г. Иосифьян*, ДАН Арм. ССР, т. VII, № 3 (1947). [2] *С. В. Страхов*, ДАН СССР, т. 117, № 3 (1957). [3] *Г. Л. Арешян*, ДАН Арм. ССР, т. VI, № 4 (1973).