

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236

УДК 621.311

## Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы

В. С. Сафарян<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Решение задачи обеспечения надежной работы электроэнергетической системы в стационарных и переходных режимах, предотвращения перехода в асинхронный режим, сохранения и восстановления устойчивости послеаварийных процессов основывается на формировании и реализации математических моделей процессов такой системы. При работе электроэнергетической системы в асинхронном режиме, помимо основных частот, в состав токов и напряжений входят гармонические составляющие, частоты которых кратны разности основных частот. При двухчастотном асинхронном режиме система эквивалентизируется в виде двухмашинной системы, работающей на обобщенную нагрузку. В статье приведены математические модели переходного процесса двухмашинной системы в натуральной форме и в системе координат  $d-q$ . Рассмотрена математическая модель двухмашинной системы при наличии у роторов двух обмоток возбуждения, показаны разновидности математических моделей (тривиальная, упрощенная, полная) переходных процессов электроэнергетической системы. Переходный процесс синхронной двухмашинной системы описывается полной моделью. Качество переходных процессов синхронной машины зависит от числа обмоток возбуждения ротора. При наличии двух обмоток возбуждения на роторе (дуальная система возбуждения) математическая модель электромагнитных переходных процессов синхронной машины представляется в комплектной форме, т. е. в системе координат  $d, q$ , а ток ротора – обобщенным вектором. При асинхронном ходе в синхронной двухмашинной системе при наличии двух обмоток возбуждения на роторе системы токов и напряжений содержат гармоники только двух частот. Приведена математическая модель синхронного стационарного процесса синхронной двухмашинной системы и рассмотрены стационарные режимы при различной структуре задания исходной информации.

**Ключевые слова:** математическая модель, асинхронный режим, двухмашинная система, переходный процесс, двухчастотный режим, обобщенная нагрузка, стационарный режим

**Для цитирования:** Сафарян, В. С. Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы / В. С. Сафарян // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 228–236. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236

---

**Адрес для переписки**

Сафарян Виталий Сафарович  
ЗАО «Научно-исследовательский институт  
энергетики»  
просп. Мясникяна, 5/1,  
0025, г. Ереван, Республика Армения  
Тел.: +374 010 559-659  
liliasafar@rambler.ru

**Address for correspondence**

Safaryan Vitali S.  
CJSC Scientific Research Institute  
of Energy  
5/1 Myasnikyan Ave.,  
0025, Yerevan, Republic of Armenia  
Tel.: +374 010 559-659  
liliasafar@rambler.ru

---

## Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines

V. S. Safaryan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Closed Joint-Stock Company (CJSC) Scientific Research Institute of Energy (Yerevan, Republic of Armenia)

**Abstract.** The solution of the problem of reliable functioning of an electric power system (EPS) in steady-state and transient regimes, prevention of EPS transition into asynchronous regime, maintenance and restoration of stability of post-emergency processes is based on formation and realization of mathematical models of an EPS processes. During the functioning of electric power system in asynchronous regime, besides the main frequencies, the currents and voltages include harmonic components, the frequencies of which are multiple of the difference of main frequencies. At the two-frequency asynchronous regime the electric power system is being made equivalent in a form of a two-machine system, functioning for a generalized load. In the article mathematical models of transient process of a two-machine system in natural form and in  $d-q$  coordinate system are presented. The mathematical model of two-machine system is considered in case of two windings of excitation at the rotors. Also, in the article varieties of mathematical models of EPS transient regimes (trivial, simple, complete) are presented. Transient process of a synchronous two-machine system is described by the complete model. The quality of transient processes of a synchronous machine depends on the number of rotor excitation windings. When there are two excitation windings on the rotor (dual system of excitation), the mathematical model of electromagnetic transient processes of a synchronous machine is represented in a complex form, i.e. in coordinate system  $d, q$ , the current of rotor being represented by a generalized vector. In asynchronous operation of a synchronous two-machine system with two excitation windings on the rotor the current and voltage systems include only harmonics of two frequencies. The mathematical model of synchronous steady-state process of a two-machine system is also provided, and the steady-state regimes with different structures of initial information are considered.

**Keywords:** mathematical model, asynchronous regime, two-machine system, transient process, dual frequency mode, generalized load, stationary mode

**For citation:** Safaryan V. S. (2017) Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 228–236. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236 (in Russian)

### Введение

Математические модели переходных процессов можно разделить на три категории:

а) тривиальная модель – учитываются только электромеханические переходные процессы синхронных и асинхронных машин [1, 2], электромагнитные переходные процессы в контурах ротора и статора машин, а также в электрической сети не учитываются;

б) упрощенная модель – учитываются электромеханические и электромагнитные переходные процессы в электрических машинах, а электрическая сеть представляется моделью установившегося (стационарного) режима [1, 3–10];

в) полная модель – электрические машины представляются электромеханической и электромагнитной моделями, а электрическая сеть, в отличие от упрощенной модели, также представляется моделью переходного процесса.

Для исследования и анализа переходных процессов современных электроэнергетических систем используется упрощенная модель, поскольку применение полной модели приводит к увеличению размерности системы нелинейных дифференциальных уравнений переходных процессов. Качество переходных процессов синхронной двухмашинной системы (СДС) зависит от числа обмоток возбуждения роторов [4, 6].

При асинхронном режиме в электрической системе наблюдаются колебания всех режимных параметров синхронных генераторов, вызванные влиянием асинхронно работающих машин друг на друга. В этом случае в состав токов и напряжений генераторов будут входить составляющие, соответствующие основным частотам асинхронного хода, которые являются определяющими для рассматриваемого процесса [1]. При построении математической модели синхронного генератора принято допущение о том, что токи и напряжения складываются из двух частотных составляющих, соответствующих средним скоростям вращения роторов асинхронно идущих машин [1].

Цель работы – формирование и исследование полной математической модели переходного и стационарного режимов двухмашинной системы.

### Результаты исследования

При возникновении двухчастотного асинхронного режима синхронные машины разделяются на две асинхронно работающие группы, а электрическая система – на две подсистемы. То есть для исследования двухчастотных режимов ЭЭС моделируется эквивалентной двухмашинной системой с обобщенной нагрузкой [1] (рис. 1).

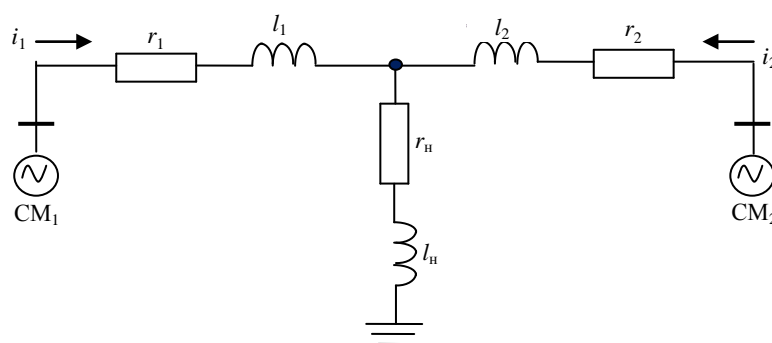


Рис. 1. Синхронная двухмашинная система:  $CM_1$ ,  $CM_2$  – синхронная машина;

$i_1 (i_{1a}, i_{1b}, i_{1c})$ ,  $i_2 (i_{2a}, i_{2b}, i_{2c})$  – трехфазный ток статора синхронной машины;

$r_1, l_1 (r_2, l_2)$  – активное сопротивление и индуктивность линии;

$r_n, l_n$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки

Fig. 1. Synchronous two-machine system:  $CM_1$ ,  $CM_2$  – synchronous machine;

$i_1 (i_{1a}, i_{1b}, i_{1c})$ ,  $i_2 (i_{2a}, i_{2b}, i_{2c})$  – three-phased current of stator of synchronous machine;

$r_1, l_1 (r_2, l_2)$  – resistance and inductance of the line;  $r_n, l_n$  – resistance and inductance of the load

Составим систему дифференциальных уравнений переходных процессов СДС:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 i_{a1} + L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos \alpha_1 - \omega_1 i_{r1} \sin \alpha_1 \right] = -u_{a1}; \\ R_1 i_{b1} + L_1 \frac{di_{b1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos(\alpha_1 - \rho) - \omega_1 i_{r1} \sin(\alpha_1 - \rho) \right] = -u_{b1}; \\ R_1 i_{c1} + L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos(\alpha_1 + \rho) - \omega_1 i_{r1} \sin(\alpha_1 + \rho) \right] = -u_{c1}; \\ r_1 i_{r1} + l_{r1} \frac{di_{r1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{a1}}{dt} \cos \alpha_1 - \omega_1 i_{a1} \sin \alpha_1 + \frac{di_{b1}}{dt} \cos(\alpha_1 - \rho) - \right. \\ \left. - \omega_1 i_{b1} \sin(\alpha_1 - \rho) + \frac{di_{c1}}{dt} \cos(\alpha_1 + \rho) - \omega_1 i_{c1} \sin(\alpha_1 + \rho) \right] = e_{r1}; \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{s1} + M_{m1}; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_2 i_{a2} + L_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos \alpha_2 - \omega_2 i_{r2} \sin \alpha_2 \right] = -u_{a2}; \\ R_2 i_{b2} + L_2 \frac{di_{b2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos(\alpha_2 - \rho) - \omega_2 i_{r2} \sin(\alpha_2 - \rho) \right] = -u_{b2}; \\ R_2 i_{c2} + L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos(\alpha_2 + \rho) - \omega_2 i_{r2} \sin(\alpha_2 + \rho) \right] = -u_{c2}; \\ r_2 i_{r2} + l_{r2} \frac{di_{r2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{a2}}{dt} \cos \alpha_2 - \omega_2 i_{a2} \sin \alpha_2 + \frac{di_{b2}}{dt} \cos(\alpha_2 - \rho) - \right. \\ \left. - \omega_2 i_{b2} \sin(\alpha_2 - \rho) + \frac{di_{c2}}{dt} \cos(\alpha_2 + \rho) - \omega_2 i_{c2} \sin(\alpha_2 + \rho) \right] = e_{r2}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{s2} + M_{m2}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $R_1 = r_1 + R_{S1}$  ( $R_2 = r_2 + R_{S2}$ ),  $R_{S1}$  ( $R_{S2}$ ) – активное сопротивление статора;  $L_1 = l_1 + L_{S1}$  ( $L_2 = l_2 + L_{S2}$ ),  $L_{S1}$  ( $L_{S2}$ ) – индуктивность рассеяния статора;  $M_1$  ( $M_2$ ) – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора при их параллельном расположении;  $i_{r1}$  ( $i_{r2}$ ) – ток ротора;

$a_1 = a_{10} + \int_0^t \omega_1 dt$  ( $a_2 = a_{20} + \int_0^t \omega_2 dt$ ) – комплексная константа;  $\omega_1$  ( $\omega_2$ ) – уг-

ловая скорость ротора;  $J_1$  ( $J_2$ ) – момент инерции ротора;  $e_{r1}$  ( $e_{r2}$ ) – электродвижущая сила обмотки возбуждения;  $M_{m1}$  ( $M_{m2}$ ) – механический момент, приложенный к валу ротора;  $\rho = 120^\circ$ ;  $M_{s1}$  ( $M_{s2}$ ) – электромагнитный момент:

$$\begin{cases} M_{31} = -M_1 i_{r1} [i_{a1} \sin \alpha_1 + i_{b1} \sin(\alpha_1 - \rho) + i_{c1} \sin(\alpha_1 + \rho)]; \\ M_{32} = -M_2 i_{r2} [i_{a2} \sin \alpha_2 + i_{b2} \sin(\alpha_2 - \rho) + i_{c2} \sin(\alpha_2 + \rho)]. \end{cases} \quad (3)$$

Правые части систем (1), (2) определяются по формулам:

$$\begin{cases} u_{a1} = u_{a2} = u_a = r_{\text{н}}(i_{a1} + i_{a2}) + L_{\text{н}} \frac{d}{dt}(i_{a1} + i_{a2}); \\ u_{b1} = u_{b2} = u_b = r_{\text{н}}(i_{b1} + i_{b2}) + L_{\text{н}} \frac{d}{dt}(i_{b1} + i_{b2}); \\ u_{c1} = u_{c2} = u_c = r_{\text{н}}(i_{c1} + i_{c2}) + L_{\text{н}} \frac{d}{dt}(i_{c1} + i_{c2}). \end{cases} \quad (4)$$

Представим (1) и (2) обобщенными векторами в системах координат, вращающихся с угловыми скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\begin{cases} (Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1 i_{r1} = -[r_{\text{н}} + (p + j\omega_1)L_{\text{н}}]\dot{I}_1 - \\ - [r_{\text{н}} + (p + j\omega_2)L_{\text{н}}]\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1 I_{d1} + (r_{r1} + pL_{r1}) = e_{r1}; \\ J_1 p\omega_1 = -1,5M_1 i_{r1} I_{q1} + M_{m1}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} (Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2 i_{r2} = -[r_{\text{н}} + (p + j\omega_2)L_{\text{н}}]\dot{I}_2 - \\ - [r_{\text{н}} + (p + j\omega_1)L_{\text{н}}]\dot{I}_1 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_2 I_{d2} + (r_{r2} + pL_{r2}) = e_{r2}; \\ J_2 p\omega_2 = -1,5M_2 i_{r2} I_{q2} + M_{m2}. \end{cases} \quad (6)$$

где  $Z_1 = R_1 + j\omega_1 L_1$ ;  $Z_2 = R_2 + j\omega_2 L_2$ ;  $\dot{I}_1 = I_{q1} + jI_{d1}$ ;  $\dot{I}_2 = I_{q2} + jI_{d2}$ ;  
 $p = \frac{d}{dt}$ .

Перенеся первые слагаемые правой части в системах (5), (6), получим:

$$\begin{cases} (Z_{\text{н1}} + Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1 i_{r1} = -[Z_{\text{н2}} + pL_{\text{н}}]\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1 I_{d1} + (r_{r1} + pL_{r1})i_{r1} = e_{r1}; \\ J_1 p\omega_1 = -1,5M_1 i_{r1} i_{q1} + M_{m1}; \\ (Z_{\text{н2}} + Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2 i_{r2} = -[Z_{\text{н1}} + pL_{\text{н}}]\dot{I}_1 e^{-j\delta}; \\ 1,5pM_2 I_{d2} + (r_{r2} + pL_{r2})i_{r2} = e_{r2}; \\ J_2 p\omega_2 = -1,5M_2 i_{r2} i_{q2} + M_{m2}. \end{cases} \quad (7)$$

где  $Z_{\text{н1}} = r_{\text{н}} + j\omega_1 L_{\text{н}}$ ;  $Z_{\text{н2}} = r_{\text{н}} + j\omega_2 L_{\text{н}}$ ;  $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$ .

Система (7) описывает нестационарные, в общем случае – несинхронные (асинхронные) процессы СДС (искомыми являются  $\dot{I}_1$ ,  $i_{r1}$ ,  $\omega_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r2}$ ,  $\omega_2$ ).

Синхронный процесс ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ) СДС описывается стационарной системой уравнений, в которой режимные параметры не зависят от времени. Математическая модель синхронного ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ) стационарного ( $p = 0$ ) процесса СДС имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_H)\dot{I}_1 + Z_H\dot{I}_2 e^{j\delta} = \omega M_1 i_{r1}; \\ Z_H\dot{I}_1 e^{-j\delta} + (Z_2 + Z_H)\dot{I}_2 = \omega M_2 i_{r2}; \\ r_{r1} i_{r1} = e_{r1}; \\ r_{r2} i_{r2} = e_{r2}; \\ 1,5M_1 i_{r1} i_{q1} = M_{m1}; \\ 1,5M_2 i_{r2} i_{q2} = M_{m2}. \end{cases} \quad (8)$$

Преобразуя первые два комплексных уравнения системы (8), получим:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_H)\dot{I}_1 + Z_H\dot{I}_2 e^{j\delta} = E_1; \\ Z_H\dot{I}_1 + (Z_2 + Z_H)\dot{I}_2 e^{j\delta} = E_2 e^{j\delta}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $E_1 = \omega M_1 i_{r1}$ ;  $E_2 = \omega M_2 i_{r2}$ .

Системе уравнений соответствует сеть, схема которой представлена на рис. 2.

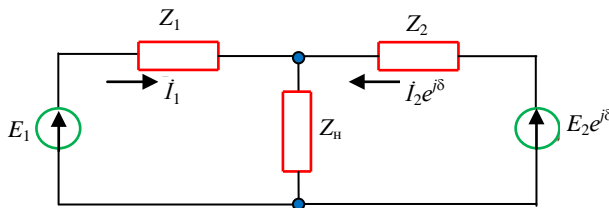


Рис. 2. Схема замещения синхронной двухмашинной системы в синхронном стационарном режиме

Fig. 2. Equivalent circuit of synchronous two-machine system in synchronous steady state regime

Рассмотрим синхронный стационарный режим при различных постановках задачи. Примем, что конструктивные параметры СДС (активные сопротивления и индуктивности синхронных машин, линий и нагрузки, взаимные индуктивности, моменты инерции) заданы. При различной структуре задании внешних параметров СДС ( $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $M_{m1}$ ,  $M_{m2}$ ) рассмотрим режимные параметры ( $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ,  $\omega$ ,  $\delta$ ), воспользовавшись математической моделью (8).

1. Заданными являются:  $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ , искомыми –  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ,  $M_{m1}$ ,  $M_{m2}$ .

Определяем  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$  непосредственно из третьего и четвертого уравнений системы (8):

$$i_{r1} = \frac{e_{r1}}{r_{r1}}; i_{r2} = \frac{e_{r2}}{r_{r2}}.$$

Находим  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  совместным решением первых двух уравнений системы (8):

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = [E_1(Z_2 + Z_H) - E_2 Z_H e^{j\delta}] / \Delta; \\ \dot{I}_2 = [E_2(Z_1 + Z_H) - E_1 Z_H e^{j\delta}] / \Delta, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta = (Z_1 + Z_H)(Z_2 + Z_H) - Z_H^2 = Z_1 Z_2 + Z_H(Z_1 + Z_2)$ .

Параметры  $M_{m1}, M_{m2}$  определяем из последних двух уравнений (8). Зависимости комплексных токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  (10) от  $\delta \in [0, 2\pi]$  выражаются дробно-линейной функцией комплексной переменной и изображаются окружностью (рис. 3а). График зависимости механических моментов  $M_{m1}, M_{m2}$  от параметра  $\delta \in [0, 2\pi]$  имеет вид эллипса, представленного на рис. 3б.

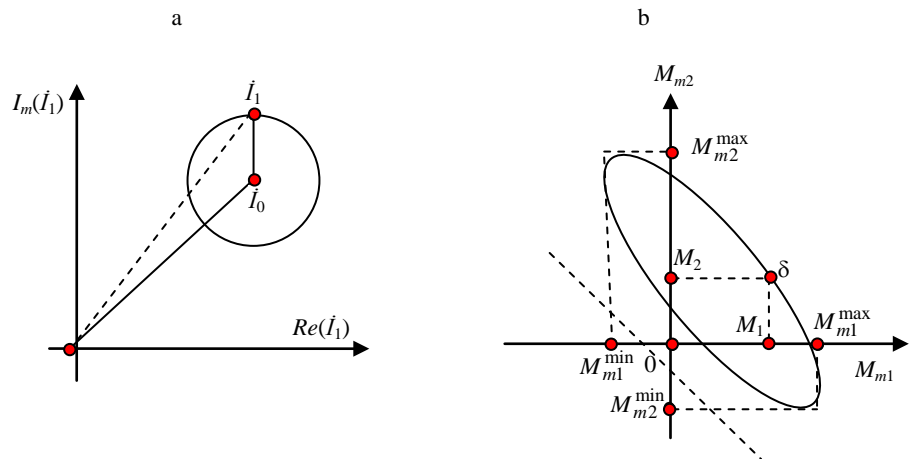


Рис. 3. Графики зависимостей  $\dot{I}_1(\delta)$  (а) и  $M_{m1}(\delta), M_{m2}(\delta)$  (б)

Fig. 3. Dependence curves:  $\dot{I}_1(\delta)$  (a) and  $M_{m1}(\delta), M_{m2}(\delta)$  (b)

На рис. 3а  $\dot{I}_0 = \frac{E_1(Z_2 + Z_H)}{\Delta}$ , а радиус окружности равен  $E_1 \frac{|Z_H|}{|\Delta|}$ . График

эллипса на рис. 3б расположен выше прямой  $M_{m1} + M_{m2} = 0$ . Поставленная задача имеет единственное решение.

2. Заданными являются:  $e_{r1}, e_{r2}, M_{m1}, M_{m2}$ , искомыми –  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, i_{r1}, i_{r2}, \delta, \omega$ .

Определяем  $i_{r1}, i_{r2}$  непосредственно из третьего и четвертого выражений системы (8). Из последних двух уравнений (8) находим  $i_{d1}, i_{d2}, \omega, \delta$ , сведя к решению нелинейных трансцендентных уравнений. В отличие от

предыдущей постановки, решение задачи может не существовать или задача может иметь несколько решений, у которых  $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$  одинаковые.

При асинхронном движении ( $\omega_1 \neq \omega_2$ ) СДС образуется лавина частот, содержащая  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $k(\omega_1 - \omega_2)$ , где  $k$  – целое число, а токи, напряжения, электромагнитный момент получаются несинусоидальными. Покажем, что при наличии на роторах синхронных машин двух обмоток возбуждения при асинхронном движении СДС токи и напряжения содержат гармоники только двух частот ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ). Математическая модель переходного электромагнитного процесса при наличии на роторах двух обмоток возбуждения имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (Z_{н1} + Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1\dot{I}_{r1} = -(Z_{н2} + pL_н)\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1\dot{I}_1 + (r_{r1} + pL_{r1})\dot{I}_{r1} = \dot{e}_{r1}; \\ (Z_{н2} + Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2\dot{I}_{r2} = -(Z_{н1} + pL_н)\dot{I}_1 e^{-j\delta}; \\ 1,5pM_2\dot{I}_2 + (r_{r2} + pL_{r2})\dot{I}_{r2} = \dot{e}_{r2}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\dot{I}_{r1}$  ( $\dot{I}_{r2}$ ) – комплексный ток ротора, компонентами которого являются токи по осям  $d$ ,  $q$ ;  $\dot{e}_{r1}$  ( $\dot{e}_{r2}$ ) – комплексная ЭДС возбуждения ротора, компонентами которой являются ЭДС по осям  $d$ ,  $q$ .

Предполагаем, что токи статоров и роторов СДС меняются по следующим законам:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = a_1 + b_1 e^{j\delta}; \\ \dot{I}_2 = a_2 + b_2 e^{-j\delta}; \\ \dot{I}_{r1} = c_1 + d_1 e^{j\delta}; \\ \dot{I}_{r2} = c_2 + d_2 e^{-j\delta}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$  – комплексные константы.

Непосредственной подстановкой выражений токов (12) в (11) убеждаемся, что они удовлетворяют системе (11).

### ВЫВОДЫ

1. Получены математические модели переходных процессов синхронной двухмашинной системы в натуральной форме и в системе координат  $d, q$ .

2. Исследован стационарный процесс синхронной двухмашинной системы при различных способах задания независимой информации.

3. В асинхронных режимах синхронной двухмашинной системы образуется лавина частот, которая содержит гармоники частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $k(\omega_1 - \omega_2)$ , где  $k$  – целое число.

4. При наличии на роторах синхронных машин двух обмоток возбуждения при асинхронном движении синхронной двухмашинной системы токи и напряжения содержат гармоники только двух частот ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ).



## ЛИТЕРАТУРА

1. Наровлянский, В. Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы / В. Г. Наровлянский. М.: Энергоатомиздат, 2004. 360 с.
2. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
3. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. М.: Госэнергоиздат, 1960. 551 с.
4. Арешян, Г. Л. Специальные вопросы теории электрических машин переменного тока / Г. Л. Арешян. Ереван, 1999. 300 с.
5. Наровлянский, В. Г. Метод определения эквивалентных параметров схемы замещения энергосистемы в асинхронном режиме / В. Г. Наровлянский, А. А. Налевин // Электричество. 2005. № 8. С. 15–21.
6. Пирматов, Н. Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н. Б. Пирматов, М. Г. Ахматов, Н. К. Катаров // Электричество. 2003. № 2. С. 64–65.
7. Якимец, И. В. Определение эквивалентных параметров энергосистемы для адаптивного функционирования противоаварийной автоматики / И. В. Якимец, Г. А. Дмитриева, А. А. Налевин // Электричество. 2003. № 7. С. 2–9.
8. Гоник, Я. Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я. Е. Гоник, Е. С. Иглицкий. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 111.
9. Бринкис, К. А. Микропроцессорное устройство предотвращения асинхронного хода / К. А. Бринкис, Г. И. Бочкарева, А. С. Саухатас // Электричество. 1990. № 2. С. 36–38.
10. Якимец, И. В. Обобщенные способы выявления асинхронного режима энергосистемы / И. В. Якимец, И. З. Глускин, В. Г. Наровлянский // Электричество. 1997. № 11. С. 9–15.

Поступила 15.04.2016 Подписана в печать 27.06.2016 Опубликована онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. Narovlyansky V. G. (2004) *Modern Methods and Means of Prevention of Asynchronous Operation of the Power Grid*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 360 (in Russian).
2. Venikov V. A. (1985) *Transient Electromechanical Processes in Electrical Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola. 536 (in Russian).
3. Gorev A. A. (1960) *Transients of the Synchronous Machine*. Moscow, Gosenergoizdat. 551 (in Russian).
4. Areshian G. L. (1999) *Special Issues of Theory of Alternating Current Electric Machines*. Yerevan. 300 (in Russian).
5. Narovlyansky V. G., Nalyevin A. A. (2005) Method of Determining Equivalent Parameters of the Equivalent Circuit of the Power Grid in Asynchronous Mode. *Elektrichestvo* [Electricity], (8), 15–21 (in Russian).
6. Pirmatov N. B., Akhmatov M. G., Katalov N. K. (2003) The Study of the Synchronous Motor with Excitation by Longitudinal and Transverse Axes Under Shock Load. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 64–65 (in Russian).
7. Yakimets I. V., Dmitriyeva G. A., Nalyevin A. A. (2003) Determination of Equivalent Parameters of Power System for Adaptive Operation of Emergency Automatic Control. *Elektrichestvo* [Electricity], (7), 2–9 (in Russian).
8. Gonik Ya. E., Iglitskiy Ye. S. (1988) *Automatic Elimination of Asynchronous Mode*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 111 (in Russian).
9. Brinkis K. A., Bochkareva G. I., Saukhatas A. S. (1990) Microprocessor Device for Preventing Asynchronous Course. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 36–38 (in Russian).
10. Yakimets I. V., Gluskin I. Z., Narovlyansky V. G. (1997) Generalized Methods for Detection of the Asynchronous Mode of the Power System. *Elektrichestvo* [Electricity], (11), 9–15 (in Russian).

Received: 15 April 2016

Accepted: 27 June 2016

Published online: 30 May 2017