УДК 519.86:621.313.322:621.3.013.8

РАЗРАБОТКА БАЗОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОТЕРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Джунуев Тимур Тилегенович. *Старший преподаватель, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г.Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, Тел. 0312 545149, ORCID ID 0000 0001 6143 2606*

Аннотация. Общая теория асинхронных режимов синхронных машин в литературе рассматривалось неоднократно. Однако многое в этом вопросе оставалось невыясненным, о поведении которых при асинхронных режимах до последнего времени существовало мнение, что момент, развиваемый синхронных генератором, при асинхронном режиме при потере возбуждения, незначительный.

Для определения изменения параметров режима в таких случаях необходима разработка методики расчета, которая базируется на математических моделях основных элементов энергосистемы.

Целью данной статьи являлось разработка базовой математической модели синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения. Часть уравнений переходных процессов в синхронном генераторе при асинхронном режиме решается методом Рунге-Кутта четвертого порядка с использованием существующей стандартной подпрограммы.

Упрощенная модель синхронного генератора состоит из двух частей: системы алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений, где определяются токи статорных и роторных контуров. Совместное решение этих алгебраических и дифференциальных уравнений позволяет определить изменяющиеся при асинхронном режиме параметры синхронного генератора.

Ключевые слова: математическая модель, возбуждение, генератор, режим, ротор, асинхронный режим, обмотка, синхронная машина

DEVELOPMENT OF THE BASIC MATHEMATICAL MODEL OF A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH THE LOSS OF EXCITATION

Dzhunuev Timur Tilegenovich. *Senior Lecturer, KSTU. I. Razzakova, 720044, Bishkek city, Aytmatov Avenue, 66, Тел. 0312 545149, ORCID ID 0000 0001 6143 2606*

Annotation. The general theory of asynchronous modes of synchronous machines has been considered repeatedly in the literature. However, much remained unanswered in this matter, the behavior of which, under asynchronous regimes, until recently, there was an opinion that the instant developed by the synchronous generator, in the asynchronous mode with loss of excitation, is insignificant.

To determine the change in the parameters of the regime in such cases, it is necessary to develop a calculation technique that is based on mathematical models of the main elements of the power system.

The purpose of this article was to develop a basic mathematical model of a synchronous generator in an asynchronous mode with loss of excitation. Part of the equations of transient processes in a synchronous generator under asynchronous mode is solved by the fourth-order Runge-Kutta method using the existing standard subroutine.

A simplified model of a synchronous generator consists of two parts: a system of algebraic equations and differential equations, where the currents of the stator and rotor circuits are determined. The simultaneous solution of these algebraic and differential equations makes it possible to determine the parameters of a synchronous generator that change during an asynchronous mode.

Keywords: mathematical model, excitation, generator, mode, rotor, asynchronous mode, winding, synchronous machine

Запишем уравнения Горева-Парка, описывающие переходные процессы в синхронном генераторе, в следующем виде [1]:

$$-P\Psi_d - \omega_s(1+s)\cdot\Psi_q - r\cdot i_d = U_d;$$

$$-P\Psi_q - \omega_s(1+s)\cdot\Psi_d - r\cdot i_q = U_q;$$

$$P\Psi_f + r_f\cdot i_f = U_f; \qquad (1)$$

$$P\Psi_{1d} + r_{1d}\cdot i_{1d} = 0;$$

$$P\Psi_{1q} + r_{1q} \cdot i_{1q} = 0;$$

$$J\omega_s PS + \frac{3}{2}(\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) = m_T;$$

Система (1) записана в именованных единицах (и.е.). Чтобы получить во взаимной системе относительных единиц (о.е.) первые пять уравнений системы (1) разделим на $\Psi_Б$, а последнее на $m_Б$:

$$\begin{aligned}
&-P\frac{\Psi_d}{\Psi_Б} - \omega_s(1+s)\cdot\frac{\Psi_q}{\Psi_Б} - r\cdot\frac{i_d}{\Psi_Б} = \frac{U_d}{\Psi_Б};\\
&-P\frac{\Psi_q}{\Psi_Б} + \omega_s(1+s)\cdot\frac{\Psi_d}{\Psi_Б} - r\cdot\frac{i_q}{\Psi_Б} = \frac{U_q}{\Psi_Б};\\
&P\frac{\Psi_f}{\Psi_{fБ}} + r_f\cdot\frac{i_f}{\Psi_{fБ}} = \frac{U_f}{\Psi_{fБ}};\\
&P\frac{\Psi_{1d}}{\Psi_{1Б}} + r_{1d}\cdot\frac{i_{1d}}{\Psi_{1Б}} = 0;\\
&P\frac{\Psi_{1q}}{\Psi_{1Б}} + r_{1q}\cdot\frac{i_{1q}}{\Psi_{1Б}} = 0;\\
&J\frac{\omega_s}{m_Б}PS + \frac{3}{2}(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)/m_Б = \frac{m_T}{m_Б}.
\end{aligned} \qquad (2)$$

С учетом $\Psi_Б = \dfrac{U_Б}{\omega_Б}$ и $Z_Б = \dfrac{U_Б}{I_Б}$, $\omega_Б = \omega_S$ систему (2) запишем:

$$\begin{aligned}
&-P\Psi_{*d} - \omega_s(1+s)\Psi_{*q} - \frac{r}{Z_Б}\cdot\frac{i_d}{I_Б}\omega_Б = \frac{U_d}{U_Б}\omega_Б;\\
&-P\Psi_{*q} + \omega_s(1+s)\Psi_{*d} - \frac{r}{Z_Б}\cdot\frac{i_q}{i_Б}\omega_Б = \frac{U_q}{U_Б}\omega_Б;\\
&P\Psi_{*f} + \frac{r_f}{Z_{fБ}}\cdot\frac{i_f}{I_{fБ}}\omega_Б = \frac{U_f}{U_{fБ}}\omega_Б;\\
&P\Psi_{*1d} + \frac{r_{1d}}{Z_{1Б}}\cdot\frac{i_{1d}}{I_{1Б}}\omega_Б = 0;\\
&P\Psi_{*1q} + \frac{r_{1q}}{Z_{1Б}}\cdot\frac{i_{1q}}{I_{1Б}}\omega_Б = 0.
\end{aligned} \qquad (3)$$

С учетом $m_Б = \dfrac{S_Б}{\omega_Б}$, шестое уравнение системы (2) запишем:

$$J\frac{\omega_Б^2}{S_Б}PS + \frac{3}{2}\frac{(\psi_d i_q - \psi_q i_d)}{S_Б}\cdot\omega_Б = m_{*T}$$

Принимая во внимание, что $T_J = \dfrac{\omega_Б^2}{S_Б}J$, $S_Б = \dfrac{3}{2}U_Б I_Б$ и $U_Б = \psi_Б\omega_Б$, т.е. $S_Б = \dfrac{3}{2}\psi_Б I_Б\omega_Б$ полученное шестое уравнение запишется как

$$T_J PS + \left(\frac{\psi_d i_q}{\psi_Б I_Б} - \frac{\psi_q i_d}{\psi_Б I_Б} \right) = m_{*T} ,$$

Теперь систему (3) можно записать:

$$\begin{aligned}
&-P\Psi_{*d} - \omega_s (1+s) \cdot \Psi_{*q} - r_* i_{*d} \omega_S = U_{*d} \omega_S ; \\
&-P\Psi_{*q} - \omega_s (1+s) \cdot \Psi_{*d} - r_* i_{*q} \omega_S = U_{*q} \omega_S ; \\
&P\Psi_{*f} + r_{*f} i_{*f} \omega_S = U_{*f} \omega_S ; \\
&P\Psi_{*1d} + r_{*1d} i_{*1d} \omega_S = 0; \\
&P\Psi_{*1q} + r_{*1q} i_{*1q} \omega_S = 0; \\
&T_J PS + \left(\psi_{*d} i_{*q} - \psi_{*q} i_{*d} \right) = m_{*T} .
\end{aligned} \qquad (4)$$

В этих выражениях все величины безразмерные, кроме времени t и инерционной постоянной T_J [сек];

Опуская «звездочки» и зная, что $\omega_S = 1$ систему (4) запишем:

$$\begin{aligned}
&P\Psi_d = -U_d - (1+s) \cdot \Psi_{*q} - r i_{*d} ; \\
&P\Psi_{*q} = -U_q + (1+s) \cdot \Psi_d - r i_{*q} ; \\
&P\Psi_f = U_f - r_f i_f ; \\
&P\Psi_{1d} = -r_{1d} i_{1d} ; \\
&P\Psi_{1q} = -r_{1q} i_{1q} ; \\
&PS = \left(M_T - M_Э \right) / T_J ; \\
&P\delta = S.
\end{aligned} \qquad (5)$$

Систему уравнений (5) можно записать в матричной форме:

$$P \begin{vmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} U_d \\ -U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{vmatrix} + \overset{[s]}{\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & -(1+s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1+s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}} \cdot \begin{vmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{vmatrix} + \overset{[R]}{\begin{vmatrix} -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_{1q} \end{vmatrix}} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} \cdot \omega_s \quad (6)$$

Выразив потокосцепление через токи в системе (6) получим:

$$\begin{vmatrix} A \end{vmatrix} \cdot P \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} U_d \\ -U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} s \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} ; \qquad (7)$$

Или

$$P\begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_d \\ -U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \omega_s - \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} s \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} R \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix}; \qquad (8)$$

Систему уравнений (8) можно записать в сокращенной матричной форме:

$$P\left[\bar{i}\right] = -[A]^{-1} \cdot \left[\bar{U}\right] - [A]^{-1} \cdot [S] \cdot [A] \cdot \left[\bar{i}\right] + [A]^{-1} \cdot [R] \cdot \left[\bar{i}\right] \qquad (9)$$

В случае замкнутой ОВ система дифференциальных уравнений запишутся в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} i_{d_{n+1}} \\ i_{f_{n+1}} \\ i_{1d_{n+1}} \\ i_{q_{n+1}} \\ i_{1q_{n+1}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i_{d_n} \\ i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_d \\ 0 \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \Delta t - \left(\begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} s \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} R \end{vmatrix} \right) \cdot \begin{vmatrix} i_{d_n} \\ i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} \cdot \Delta t, \qquad (10)$$

При замкнутой ОВ $U\mathrm{f}=0$

Упрощенные уравнение синхронного генератора (10) в разностной форме имеют следующий вид:

а) при разомкнутой ОВ

$$\begin{vmatrix} i_{d_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_q & X_{aq} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_d \\ 0 \\ -U_q \\ 0 \end{vmatrix} + [X]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ 0 \\ i_q \\ 0 \end{vmatrix}, \qquad (11)$$

$$\begin{vmatrix} i_{1d_{n-1}} - i_{1d_n} \\ i_{1q_{n+1}} - i_{1q_n} \end{vmatrix} = -[A]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} \omega_s \Delta t \qquad (12)$$

$$\begin{vmatrix} i_{1d_{n-1}} \\ i_{1q_{n+1}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i_{1d_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} - [A]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} \omega_s \Delta t \qquad (13)$$

б) при замкнутой ОВ

$$\begin{vmatrix} i_{d_n} \\ i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_{d_n} \\ 0 \\ 0 \\ -U_{q_n} \\ 0 \end{vmatrix} + [X]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_{d_n} \\ 0 \\ 0 \\ i_{q_n} \\ 0 \end{vmatrix} \qquad (14)$$

$$\begin{vmatrix} i_{f_{n+1}} - i_{f_n} \\ i_{1d_{n+1}} - i_{1d_n} \\ i_{1q_{n+1}} - i_{1q_n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} \cdot \omega_s \Delta t \qquad (15)$$

или

$$\begin{vmatrix} i_{f_{n+1}} \\ i_{1d_{n+1}} \\ i_{1q_{n+1}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{1q_n} \end{vmatrix} \cdot \omega_s \Delta t \qquad (16)$$

При этом решение уравнений механики остаются прежними, аналогичными вышерассмотренному.

Первая часть вышерассмотренных уравнений переходных процессов в синхронном генераторе при асинхронном режиме решается методом Рунге-Кутта четвертого порядка с использованием существующей стандартной подпрограммы.

Как указывалось ранее, в установившемся асинхронном режиме при постоянном скольжении членами $P\Psi_d$ и $P\Psi_q$ можно пренебречь, если отбрасывать и члены $s\Psi_d$ и $s\Psi_q$.

Уравнения роторных контуров остаются без изменения. Тогда уравнения, описывающие изменения параметров режима синхронной машины, которые называют упрощенными, запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
&-\Psi_q - ri_d = U_d \\
&\Psi_d - ri_q = U_q \\
&P\Psi_f = U_f\omega_s - r_f i_f \omega_s \\
&P\Psi_{1d} = -r_{1d} i_{1d} \omega_s \\
&P\Psi_{1q} = -r_{1q} i_{1q} \omega_s
\end{aligned} \tag{17}$$

Первые два уравнения данной системы разрешим относительно потокосцеплений и запишем в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_q \\ -U_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \tag{18}$$

С другой стороны из системы (18) можем записать:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix}; \tag{19}$$

Тогда, приравняв правые части полученных систем уравнений, имеем:

$$\begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_q \\ -U_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix},$$

или

$$\begin{vmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_d \\ 0 \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{vmatrix} + [X]^{-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ 0 \\ 0 \\ i_q \\ 0 \end{vmatrix}; \tag{20}$$

Перепишем последнее три уравнения системы (17) в матричной форме:

$$P\begin{vmatrix} \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_{1q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_f \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \omega_s - \begin{vmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} \cdot \omega_s; \tag{21}$$

Выражая потокосцепление через токи, получим:

$$\begin{vmatrix} X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & X_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & X_{1q} \end{vmatrix} P \begin{vmatrix} i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_f \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \omega_s - \begin{vmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} \cdot \omega_s ; \qquad (22)$$

или

$$P \begin{vmatrix} i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & X_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & X_{1q} \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_f \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \omega_s - \begin{vmatrix} X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & X_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & X_{1q} \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{vmatrix} \cdot \omega_s \qquad (23)$$

Таким образом, упрощенная модель синхронного генератора состоит из двух частей: системы алгебраических уравнений (18) и дифференциальных уравнений (23), где определяются токи статорных и роторных контуров.

Совместное решение этих алгебраических и дифференциальных уравнений позволяет определить изменяющиеся при асинхронном режиме параметры синхронного генератора.

Выводы: 1. Базовая модель синхронного генератора в асинхронном режиме основывается на применении полных уравнений Горева-Парка, при этом достаточно точно отражаются физические процессы в данном режиме.

2. При плавном изменении параметров режима в установившемся асинхронном режиме при потере возбуждения.

Список литературы

1. Джунуев Т.А. Об определении квазиустановившегося режима в электроэнергетической системе. Сборник научных трудов «Известия», КГТУ, 2012, 5 с.
2. Джунуев Т.А., Абдымомунова А.К. Сравнительный анализ теории катастроф и традиционных методов при расчете устройств ЭС. Сборник научных трудов «Известия», КГТУ, 2012, 7 с.
3. Джунуев Т.А., Козлов А.Н. Переходные процессы при упрощенном представлении электроэнергетической системы ограниченной мощности. Сборник научных трудов «Вестник» Амурского государственного университета Энергетика, серия 57, 2012, 6с.
4. Джунуев Т.А., Козлов А.Н. Влияние нагрузки на устойчивость электроэнергетической системы ограниченной мощности. Сборник научных трудов «Вестник» Амурского государственного университета, Энергетика, серия 57, 2012, 7 с.
5. Джунуев Т.А., Козлов А.Н. Каскадное развитие аварии в ЭС ограниченной мощности

   Вестник Амурского гос. ун-та. - 2012. - Вып. 59, сер. "Естеств. и экон. науки", - с. 98-101.
6. Джунуев Т.А., Козлов А.Н. Полная модель для исследования переходных процессов электроэнергетических систем ограниченной мощности. Вестник Амурского гос. ун-та. - 2012. - Вып. 59, сер. "Естеств. и экон. науки", - с. 106-109.
7. Джунуев Т.А., Мамакеева А.К. Интеллектуальные сети как способ повышения надежности ЭЭС ограниченной мощности. Сборник научных трудов «Известия», КГТУ, 2012
8. Джунуев Т.А., Таабалдиева Н.Д., Абдылдаева М.Т. Программный комплекс для исследования устойчивости электроэнергетических систем ограниченной мощности. Сборник научных трудов «Известия», КГТУ, 2012
9. Жданов П.С. О статической устойчивости сложных электрических систем. В кн.: Лебедев С.А., Жданов П.С., Городский Д.А., Кантор Р.М. Устойчивость электрических систем. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1940.
10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. / Учебник для электроэнергетических и энергетических вузов и факультетов. - М.: Энергия, 1970.