

УДК 621.315.01

## ПОЛНАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

ТААБАЛДИЕВА Н.Д.  
[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

*Представлена методика формирования полной математической модели ЭЭС для расчета переходных процессов электроэнергетических систем ограниченной мощности на примере энергосистемы Кыргызской Республики.*

*The technique of formation of full mathematical model ЭЭС for calculation of transients of electropower systems from the limited capacity on an example of a power supply system of the Kirghiz republic is presented.*

В настоящее время установленная мощность всех электростанций на территории Кыргызстана составляет 3800 МВт, в том числе ГЭС 3100 МВт. Следует отметить, что ввиду изношенности оборудования, а также высокой стоимости органического топлива (газа, мазута, угля) и трудностей в его поставках на Бишкекской ТЭЦ в работе находится ограниченное количество турбоагрегатов и практически весь север республики снабжается электроэнергией с каскада Нарынских ГЭС по единственной ЛЭП-500 кВ «ОРУ Токтогульская ГЭС – подстанция Фрунзенская».

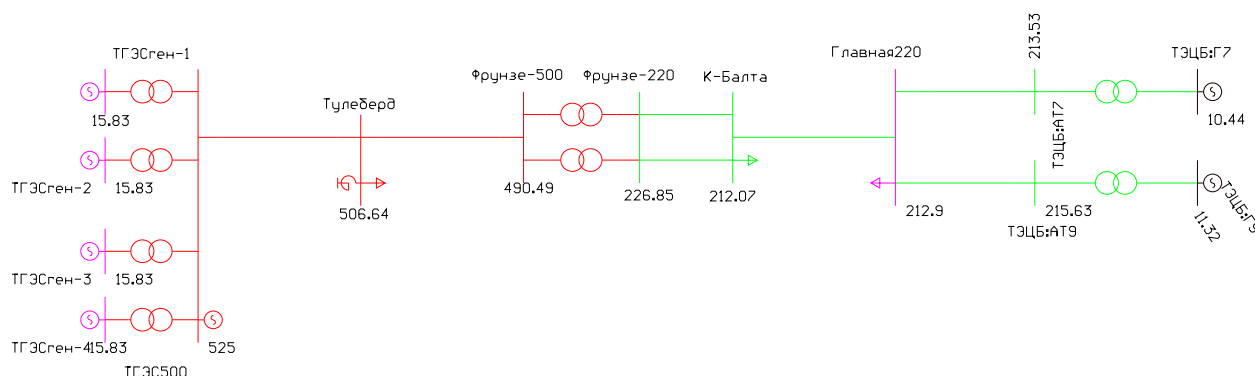


Рис.1. Электроэнергетическая система Кыргызстана

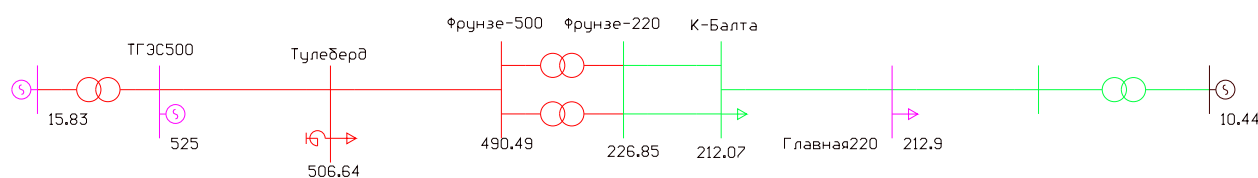


Рис.2. Упрощенная схема

В качестве резервных линий используются ЛЭП-500 кВ объединенной энергосистемы Средней Азии и Южного Казахстана «ОРУ Токтогульская ГЭС – подстанции Анддижан, Шымкент, Джамбул, Фрунзенская». Таким образом, в случае выхода из Объединенной энергосистемы Средней Азии и Южного Казахстана одной из сопредельных республик, энергосистема Кыргызстана превращается в систему ограниченной мощности. В этом случае при

расчете устойчивости ее нужно рассматривать, как работающую на шины ограниченной мощности, либо как двухмашинную систему.

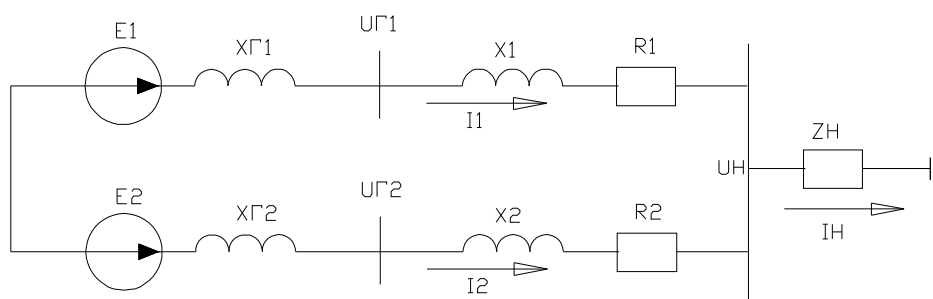


Рис.3. Двухмашинная система

Переходя к математической модели электрической системы, которая не содержит шин бесконечной мощности, следует ориентироваться на основные положения и определения, присущие сложным электроэнергетическим системам. Однако основная трудность, с которой приходится сталкиваться при расчете системы ограниченной мощности, заключается в отсутствии закрепленной оси отчета углов.

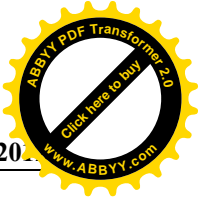
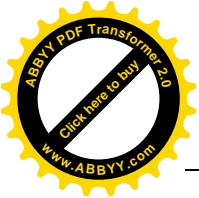
В настоящее время существует большое количество программ расчета переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС). Эти программы основаны на различных методах и алгоритмах расчета, в них реализованы различные подходы к формированию математических моделей ЭЭС. Важен вопрос об учете изменения частоты в системе в переходном процессе и представлении элементов электрической сети, и прежде всего – нагрузок.

В работах [1-3] предложены математические описания ЭЭС, учитывающие изменение частоты, в них реализован различный подход к составлению математической модели сложной ЭЭС и использованы разные механические координаты. В соответствии с [1] полная модель для анализа устойчивости учитывает электромагнитные переходные процессы и составлена по полным уравнениям Парка-Горева. К механическим координатам относятся частоты вращения векторов напряжения, для этого в модель вводятся уравнения для частот и углов векторов напряжения в узлах сети. Нагрузка представляется статическими характеристиками активной и реактивной мощностей по напряжению и частоте, при этом рассматривается частота вращения вектора напряжения в узле подключения нагрузки. Такое представление нагрузки выпадает из общей идеализации, так как оно не учитывает электромагнитные переходные процессы в статических элементах, представляющих обобщенную нагрузку. При использовании полной модели нагрузку следовало бы представлять дифференциальными уравнениями.

Предложенная в настоящей работе полная модель ЭЭС состоит из моделей синхронных машин и модели электрической сети, в которую входят трансформаторы, линии электропередачи и нагрузки. Полная модель соответствует уровню идеализации Парка-Горева и учитывает электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

Система уравнений Парка-Горева представляет собой уравнения напряжений обмоток, записанные для проекций изображающих векторов на вращающихся осях ротора  $d$  и  $q$ .

$$\begin{cases} U_d = -P\Psi_d - \Psi_q P\gamma - r i_d \\ U_f = P\Psi_f + r_f i_f \\ U_{1d} = P\Psi_{1d} + r_{1d} i_{1d} \\ U_q = -P\Psi_q + \Psi_d P\gamma - r i_q \\ U_{1q} = P\Psi_{1q} + r_{1q} i_{1q} \end{cases} \quad (1)$$



$$\begin{cases} P\Psi_d = -U_d - \Psi_q P\gamma - r i_d \\ P\Psi_f = U_f - r_f i_f \\ P\Psi_{1d} = -r_{1d} i_{1d} \\ P\Psi_q = -U_q + \Psi_d P\gamma - r i_q \\ P\Psi_{1q} = -r_{1q} i_{1q} \end{cases} \quad (2)$$

Потокосцепления через токи записываются:

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & X_{\dot{a}d} & X_{\ddot{a}d} & 0 & 0 \\ X_{\dot{a}d} & X_f & X_{\ddot{a}d} & 0 & 0 \\ X_{\dot{a}d} & X_{\dot{a}d} & X_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{\dot{a}q} \\ 0 & 0 & 0 & X_{\dot{a}q} & X_{1q} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Систему уравнений (2) запишем в матричной

форме: 
$$P \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_W \cdot \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_{1q} \end{pmatrix}}_R \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_Q \cdot \begin{pmatrix} -U_d \\ U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Используя систему уравнений (3), преобразуем уравнение (4) следующим образом:

$$LD \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} = (W \cdot L + R) \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} + Q \cdot \begin{pmatrix} -U_d \\ U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

где 
$$L = \begin{pmatrix} X_d & X_{\dot{a}d} & X_{\ddot{a}d} & 0 & 0 \\ X_{\dot{a}d} & X_f & X_{\ddot{a}d} & 0 & 0 \\ X_{\dot{a}d} & X_{\dot{a}d} & X_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{\dot{a}q} \\ 0 & 0 & 0 & X_{\dot{a}q} & X_{1q} \end{pmatrix}$$

Приводим уравнение к нормальной форме:

$$D \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} = L^{-1}(W \cdot L + R) \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ i_{1q} \end{pmatrix} + L^{-1}Q \cdot \begin{pmatrix} -U_d \\ U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Аналогично описывается 2-я машина.

Предложенная математическая модель решается с численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка и реализована с программным языком MatLab.

Переходный процесс имитировался со снижением нагрузки на 20% на подстанции «Тулелердиева».

Ниже представлены рассчитанные мгновенные значения токов по осям  $d$  и  $q$  (рис.4) по предложенной методике.

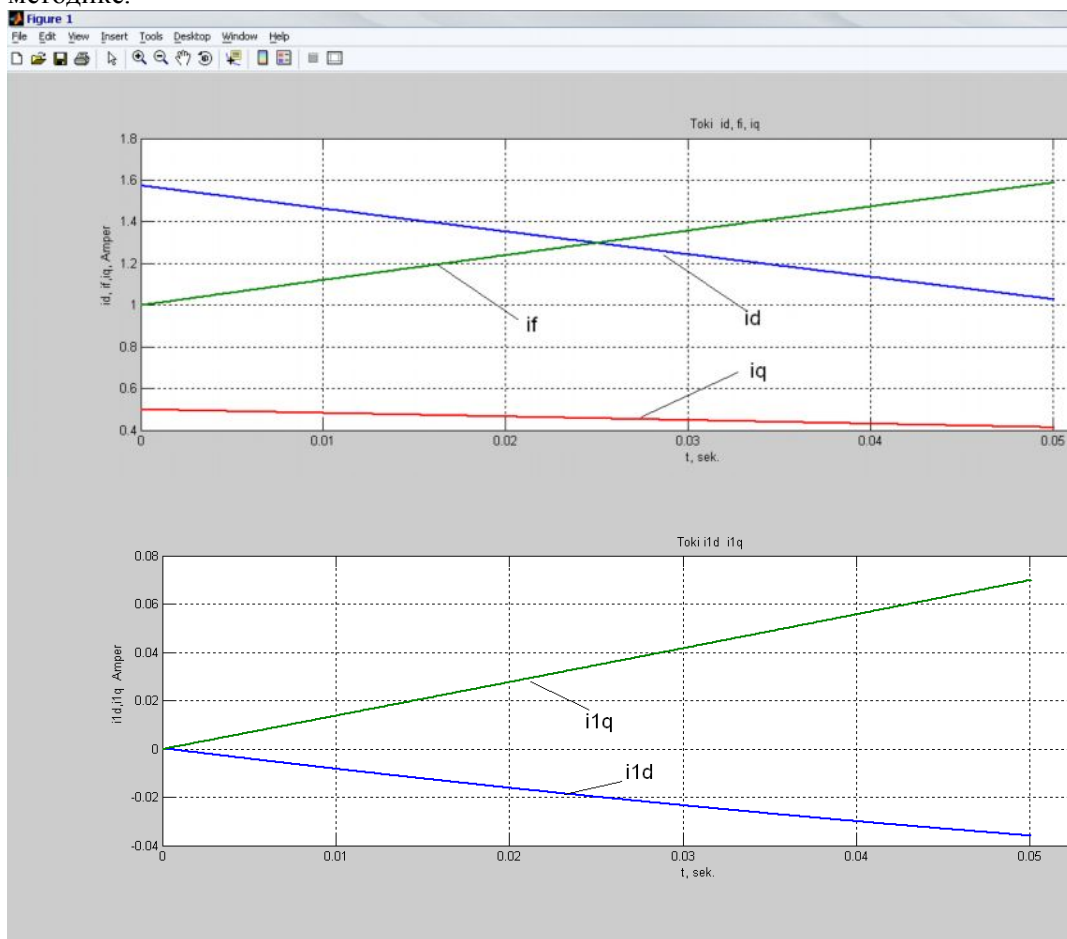


Рис.4. Мгновенные значения токов по осям  $d$  и  $q$



Результаты расчета показывают, что снижение нагрузки тока  $i_d$  возрастает, увеличивая размагничивающее действие реакции якоря и, соответственно, приводит к снижению тока возбуждения  $i_f$ . Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что программа и методика работает правильно и реально отражает физические процессы, возникающие при возмущениях в сети.

### Литература

1. Горев А.А. О статической устойчивости системы из двух синхронных машин, питающих общую нагрузку с заданными характеристиками. Избранные труды и вопросы устойчивости электроэнергетических систем. - М., Л.: Госэнергоатомиздат.
2. Лебедев С.А., Жданов П.С. О статической устойчивости сложных электрических систем. - М., Л.: Госэнергоиздат, 1940.

**Жданов П.С. Устойчивость электрических систем. - М., Л.: ГЭИ, 1948**