

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ВСЕХ БЛОКОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТЭЦ НА ВОЗБУЖДАЕМЫЙ ВО ВНЕШНЕЙ СЕТИ КРАТКОВРЕМЕННЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬС.

Чикмарев Александр Дмитриевич,
студент 5 курса

Российская Федерация, г. Москва, МГТУ им.Н.Э.Баумана, кафедра
“Метрология и взаимозаменяемость”

Научный руководитель: М.И.Кисилев

доктор физ. мат. наук,
профессор кафедры “Метрология и взаимозаменяемость”

Изучение единой электроэнергетической системы требует рассмотрения не только электромагнитных явлений, обуславливающих возможность получения, передачи и потребления электрической энергии, но и механических явлений в ее элементах: генераторах, первичных двигателях, их автоматических регуляторов, двигателях нагрузки. Таким образом, необходимо рассматривать и электрическое и механическое состояние системы, или электромеханические режимы.

При нормальной работе системы всегда имеются некоторые малые возмущающие воздействия, которые вызывают небольшие возмущения всего режима работы, например изменение нагрузки. При этом совершаются непрерывные действия регулирующих устройств так, что отклонения параметров вызванных возмущающими воздействиями происходит в пределах условно принятого равновесия.

Отклонения должны быть более или менее постоянными, и эти малые возмущения не должны нарушать устойчивость режима, не допуская прогрессивно возрастающего изменения параметров (включая и амплитуду колебаний) режима. Но довольно часто (в грозные дни) возникают экстремальные переходные процессы, вызванные не малыми возмущениями, а бросками нагрузки, короткими замыканиями или наводками от грозных разрядов в ЛЭП, что приводит к дальнейшему отключению аварийных участков и нарушению режима работы генератора и может привести к его входу из строя.

Важной задачей является оценка работы турбоагрегата при аварийном процессе, данный процесс может быть смоделирован.

Моделируется отклик ходовой части турбоагрегата (генератор, турбины низкого, среднего и высокого давления) на возбуждаемый во внешней сети кратковременный высоковольтный импульс, приходящий на вывода генератора.

Уравнения генератора, согласно уравнениям Парка-Горева,

представляющим идеализированную модель синхронной машины с постоянными параметрами в продольных и поперечных осях d, q , жестко связанных с ротором имеют вид:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + k_H \cdot \dot{i}_b \cdot I_q - (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q = M_T, \\ r \cdot I_d + L_d \cdot \dot{I}_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q - k_H \cdot \dot{i}_b = -U \cdot \sin \theta_1, \\ \omega \cdot L_d \cdot I_d + r \cdot I_q + L_q \cdot \dot{I}_q - k_H \cdot \omega \cdot \dot{i}_b = -U \cdot \cos \theta_1, \\ r_b \cdot \dot{i}_b + L_b \cdot \ddot{i}_b = U_b + k_H \cdot \dot{I}_d, \\ \omega = \omega_n + \Delta \dot{\theta}_1, \end{cases} \quad (1)$$

Здесь: q - поперечная ось ротора; d - продольная ось ротора; r, L_q, L_d - активное сопротивление и индуктивности цепи статора по продольной и поперечным осям; ω - частота вращения ротора, приведенная к угловой частоте ω_n напряжения U на выводах машины; I_d, I_q, U_d, U_q - проекции векторов полного тока I и напряжения U статора машины на продольную и поперечную оси машины; r_b, L_b - сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения; M_T - механический момент турбины; θ_1 - внутренний угол машины (угол между векторами U и ЭДС E_q); E_q - ЭДС машины в поперечной оси, возбуждаемая током в обмотке возбуждения i_b ; J_1 - постоянная инерции, приведенная к угловой частоте ω ; k_H - коэффициент пропорциональности; ω_n - угловая частота напряжения на выводах ($314c^{-1}$); U_b - напряжение обмотки возбуждения (определяется уравнением системы возбуждения).

В уравнениях традиционной механической системы, описывающей динамику ступеней турбин, турбины и ротора генератора, представляются эквивалентными системам лопаток дисками, закрепленными на упругих, способных к кручению и изгибу стержнях, эквивалентных ротору генератора и отрезкам валопровода:

$$\begin{cases} -k_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - q_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) - M_T = M_1(t), \\ J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + k_1 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + q_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1) + k_2 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + q_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3) = M_2(t), \\ J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + k_2 \cdot (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + q_2 \cdot (\theta_3 - \theta_2) + k_3 \cdot (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) + q_3 \cdot (\theta_3 - \theta_4) = M_3(t), \\ J_4 \cdot \ddot{\theta}_4 + k_3 \cdot (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3) + q_3 \cdot (\theta_4 - \theta_3) + k_4 \cdot (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5) + q_4 \cdot (\theta_4 - \theta_5) = M_4(t), \\ J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + k_4 \cdot (\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_4) + q_4 \cdot (\theta_5 - \theta_4) = M_5(t), \end{cases} \quad (2)$$

Здесь: M_T - механический момент турбины (упругий момент), возникающий при взаимодействии ротора генератора с секцией валопровода цилиндра низкого давления; $J_2 \dots J_5$ - моменты инерции дисков; $\theta_2 \dots \theta_5$ - углы поворота дисков; $q_1 \dots q_4$ - крутильные жесткости секций валопровода; $k_1 \dots k_4$ - вязкости секций валопровода; $M_1(t) \dots M_5(t)$ - внешние моменты;

Принимается, что внешнее воздействие отсутствует, $M_1(t) \dots M_5(t) = 0$;

Система автоматического регулирования возбуждения (АРВ) представляется уравнением:

$$\Delta U_b = \frac{k \cdot \Delta U}{(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p) \cdot (1 + T_3 p)} \quad (3)$$

Здесь: ΔU_b - приращение напряжение в обмотки возбуждения вызванное изменением ΔU ; k - эквивалентный коэффициент усиления; T_1 - объединенная постоянная времени усилительного, преобразовательного, измерительного элементов; T_2 - постоянная времени обмотки возбуждения; T_3 - постоянная времени обратной связи;

Объединение подсистем (1) , (2) приводит к исходной системе:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + k_H \cdot \dot{i}_b \cdot I_q - (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + k_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + q_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) = 0, \\ r \cdot I_d + L_d \cdot \dot{I}_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q - k_H \cdot \dot{i}_b = -U \cdot \sin \theta_1, \\ \omega \cdot L_d \cdot I_d + r \cdot I_q + L_q \cdot \dot{I}_q - k_H \cdot \omega \cdot i_b = -U \cdot \cos \theta_1, \\ r_b \cdot \dot{i}_b + L_b \cdot \ddot{i}_b = U_b + k_H \cdot \dot{I}_d, \\ \omega = \omega_n + \Delta \dot{\theta}_1, \\ J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + k_1 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + q_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1) + k_2 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + q_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3) = 0, \\ J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + k_2 \cdot (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + q_2 \cdot (\theta_3 - \theta_2) + k_3 \cdot (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) + q_3 \cdot (\theta_3 - \theta_4) = 0, \\ J_4 \cdot \ddot{\theta}_4 + k_3 \cdot (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3) + q_3 \cdot (\theta_4 - \theta_3) + k_4 \cdot (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5) + q_4 \cdot (\theta_4 - \theta_5) = 0, \\ J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + k_4 \cdot (\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_4) + q_4 \cdot (\theta_5 - \theta_4) = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

Система уравнений с учетом приращений для внутреннего угла, токов, момента турбины, углов поворота дисков, напряжении U, U_b представляется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \cdot (\ddot{\theta}_{10} + \Delta \ddot{\theta}_1) + k_H \cdot (\dot{i}_{b0} + \Delta \dot{i}_b) \cdot (I_{q0} + \Delta I_q) - (L_d - L_q) \cdot (I_{d0} + \Delta I_d) \cdot (I_{q0} + \Delta I_q) + \\ + k_1 ((\dot{\theta}_{10} + \Delta \dot{\theta}_1) - (\dot{\theta}_{20} + \Delta \dot{\theta}_2)) + q_1 \cdot ((\theta_{10} + \Delta \theta_1) - (\theta_{20} + \Delta \theta_2)) = 0, \\ r \cdot (I_{d0} + \Delta I_d) + L_d \cdot (\dot{I}_{d0} + \Delta \dot{I}_d) - (\omega_0 + \Delta \dot{\theta}_1) \cdot L_q \cdot (I_{q0} + \Delta I_q) - k_H \cdot (\dot{i}_{b0} + \Delta \dot{i}_b) = \\ = -(U_0 + \Delta U) \cdot \sin(\theta_{10} + \Delta \theta_1), \\ \omega \cdot L_d \cdot (I_{d0} + \Delta I_d) + r \cdot (I_{q0} + \Delta I_q) + L_q \cdot (\dot{I}_{q0} + \Delta \dot{I}_q) - k_H \cdot (\omega_0 + \Delta \dot{\theta}_1) \cdot (\dot{i}_{b0} + \Delta \dot{i}_b) = \\ = -(U_0 + \Delta U) \cdot \cos(\theta_{10} + \Delta \theta_1), \\ r_b \cdot (\dot{i}_{b0} + \Delta \dot{i}_b) + L_b \cdot (\ddot{i}_{b0} + \Delta \ddot{i}_b) = (U_{b0} + \Delta U_b) + k_H \cdot (\dot{I}_{d0} + \Delta \dot{I}_d), \\ J_2 \cdot (\ddot{\theta}_{20} + \Delta \ddot{\theta}_2) + k_1 \cdot ((\dot{\theta}_{20} + \dot{\theta}_2) - (\dot{\theta}_{10} + \dot{\theta}_1)) + q_1 \cdot ((\theta_{20} + \Delta \theta_2) - (\theta_{10} + \Delta \theta_1)) + \\ + k_2 \cdot ((\dot{\theta}_{20} + \dot{\theta}_2) - (\dot{\theta}_{30} + \dot{\theta}_3)) + q_2 \cdot ((\theta_{20} + \Delta \theta_2) - (\theta_{30} + \Delta \theta_3)) = 0, \\ J_3 \cdot (\ddot{\theta}_{30} + \Delta \ddot{\theta}_3) + k_2 \cdot ((\dot{\theta}_{30} + \dot{\theta}_3) - (\dot{\theta}_{20} + \dot{\theta}_2)) + q_2 \cdot ((\theta_{30} + \Delta \theta_3) - (\theta_{20} + \Delta \theta_2)) + \\ + k_3 \cdot ((\dot{\theta}_{30} + \dot{\theta}_3) - (\dot{\theta}_{40} + \dot{\theta}_4)) + q_3 \cdot ((\theta_{30} + \Delta \theta_3) - (\theta_{40} + \Delta \theta_4)) = 0, \\ J_4 \cdot (\ddot{\theta}_{40} + \Delta \ddot{\theta}_4) + k_3 \cdot ((\dot{\theta}_{40} + \dot{\theta}_4) - (\dot{\theta}_{30} + \dot{\theta}_3)) + q_3 \cdot ((\theta_{40} + \Delta \theta_4) - (\theta_{30} + \Delta \theta_3)) + \\ + k_4 \cdot ((\dot{\theta}_{40} + \dot{\theta}_4) - (\dot{\theta}_{50} + \dot{\theta}_5)) + q_4 \cdot ((\theta_{40} + \Delta \theta_4) - (\theta_{50} + \Delta \theta_5)) = 0, \\ J_5 \cdot (\ddot{\theta}_{50} + \Delta \ddot{\theta}_5) + k_4 \cdot ((\dot{\theta}_{50} + \dot{\theta}_5) - (\dot{\theta}_{40} + \dot{\theta}_4)) + q_4 \cdot ((\theta_{50} + \Delta \theta_5) - (\theta_{40} + \Delta \theta_4)) = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

Здесь величины с индексом "0" – номинальные значения, с индексом "Δ"-приращения;

Для случая невозмущенного стационарного состояния справедливо:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_H \cdot i_{b0} \cdot I_{q0} - (L_d - L_q) \cdot I_{d0} \cdot I_{q0} + k_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + q_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) = 0, \\ r \cdot I_{d0} - \omega_0 \cdot L_q \cdot I_{q0} = -U_0 \cdot \sin \theta_{10}, \\ \omega_0 \cdot L_d \cdot I_{d0} + r \cdot I_{q0} - k_H \cdot \omega_0 \cdot i_{b0} = -U_0 \cdot \cos \theta_{10}, \\ r_b \cdot i_{b0} = U_{b0}, \\ q_1 \cdot (\theta_{20} - \theta_{10}) + q_2 \cdot (\theta_{20} - \theta_{30}) = 0, \\ q_2 \cdot (\theta_{30} - \theta_{20}) + q_3 \cdot (\theta_{30} - \theta_{40}) = 0, \\ q_3 \cdot (\theta_{40} - \theta_{30}) + q_4 \cdot (\theta_{40} - \theta_{50}) = 0, \\ q_4 \cdot (\theta_{50} - \theta_{40}) = 0, \end{array} \right. \quad (6)$$

А для первого линейного приближения, описывающего возмущенное состояние:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \cdot \Delta \ddot{\theta}_1 + k_H \cdot i_{b0} \cdot \Delta I_q + k_H \cdot I_{q0} \cdot \Delta i_b - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} \cdot I_{d0} \cdot \Delta I_q - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} \cdot I_{q0} \cdot \Delta I_d + k_1 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) + \\ + q_1 \cdot (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) = 0, \\ J_2 \cdot \Delta \ddot{\theta}_2 + k_1 \cdot (\Delta \dot{\theta}_2 - \Delta \dot{\theta}_1) + q_1 \cdot (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_1) + k_2 \cdot (\Delta \dot{\theta}_2 - \Delta \dot{\theta}_3) + q_2 \cdot (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_3) = 0, \\ J_3 \cdot \Delta \ddot{\theta}_3 + k_2 \cdot (\Delta \dot{\theta}_3 - \Delta \dot{\theta}_2) + q_2 \cdot (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_2) + k_3 \cdot (\Delta \dot{\theta}_3 - \Delta \dot{\theta}_4) + q_3 \cdot (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_4) = 0, \\ J_4 \cdot \Delta \ddot{\theta}_4 + k_3 \cdot (\Delta \dot{\theta}_4 - \Delta \dot{\theta}_3) + q_3 \cdot (\Delta \theta_4 - \Delta \theta_3) + k_4 \cdot (\Delta \dot{\theta}_4 - \Delta \dot{\theta}_5) + q_4 \cdot (\Delta \theta_4 - \Delta \theta_5) = 0, \\ J_5 \cdot \Delta \ddot{\theta}_5 + k_4 \cdot (\Delta \dot{\theta}_5 - \Delta \dot{\theta}_4) + q_4 \cdot (\Delta \theta_5 - \Delta \theta_4) = 0, \\ r \cdot \Delta I_d + \frac{x_d}{\omega_0} \cdot \Delta I_d - x_q \cdot \Delta I_q - \frac{x_q \cdot I_{q0}}{\omega_0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 - k_H \cdot \Delta i_b = -U_0 \cdot \cos \theta_{10} \cdot \Delta \theta_1 - \Delta U \cdot \sin \theta_{10}, \\ x_d \cdot \Delta I_d + \frac{x_d}{\omega_0} \cdot I_{d0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 + r \cdot \Delta I_q + \frac{x_q}{\omega_0} \cdot \Delta I_q - k_H \cdot \omega_0 \cdot \Delta i_b - k_H \cdot i_{b0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 = \\ = U_0 \cdot \sin \theta_{10} \cdot \Delta \theta_1 - \Delta U \cdot \cos \theta_{10}, \\ r_b \cdot \Delta i_b + L_b \cdot \Delta \dot{i}_b = \Delta U_b + k_H \cdot \Delta I_d, \end{array} \right. \quad (7)$$

Так как ΔU_b связано с ΔU по средством АРВ, после введения в систему уравнений (7) уравнение связи (3) получается:

$$\left\{ \begin{array}{l}
J_1 \cdot \Delta \ddot{\theta}_1 + k_H \cdot i_{b0} \cdot \Delta I_q + k_H \cdot I_{q0} \cdot \Delta i_b - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} \cdot I_{d0} \cdot \Delta I_q - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} \cdot I_{q0} \cdot \Delta I_d + \\
+ k_1 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) + q_1 \cdot (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) = 0, \\
J_2 \cdot \Delta \ddot{\theta}_2 + k_1 \cdot (\Delta \dot{\theta}_2 - \Delta \dot{\theta}_1) + q_1 \cdot (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_1) + k_2 \cdot (\Delta \dot{\theta}_2 - \Delta \dot{\theta}_3) + q_2 \cdot (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_3) = 0, \\
J_3 \cdot \Delta \ddot{\theta}_3 + k_2 \cdot (\Delta \dot{\theta}_3 - \Delta \dot{\theta}_2) + q_2 \cdot (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_2) + k_3 \cdot (\Delta \dot{\theta}_3 - \Delta \dot{\theta}_4) + q_3 \cdot (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_4) = 0, \\
J_4 \cdot \Delta \ddot{\theta}_4 + k_3 \cdot (\Delta \dot{\theta}_4 - \Delta \dot{\theta}_3) + q_3 \cdot (\Delta \theta_4 - \Delta \theta_3) + k_4 \cdot (\Delta \dot{\theta}_4 - \Delta \dot{\theta}_5) + q_4 \cdot (\Delta \theta_4 - \Delta \theta_5) = 0, \\
J_5 \cdot \Delta \ddot{\theta}_5 + k_4 \cdot (\Delta \dot{\theta}_5 - \Delta \dot{\theta}_4) + q_4 \cdot (\Delta \theta_5 - \Delta \theta_4) = 0, \\
r \cdot \Delta I_d + \frac{x_d}{\omega_0} \cdot \dot{\Delta I}_d - x_q \cdot \Delta I_q - \frac{x_q \cdot I_{q0}}{\omega_0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 - k_H \cdot \dot{\Delta i}_b = -U_0 \cdot \cos \theta_{10} \cdot \Delta \theta_1 - \Delta U \cdot \sin \theta_{10}, \\
x_d \cdot \Delta I_d + \frac{x_d}{\omega_0} \cdot I_{d0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 + r \cdot \Delta I_q + \frac{x_q}{\omega_0} \cdot \dot{\Delta I}_q - k_H \cdot \omega_0 \cdot \Delta i_b - k_H \cdot i_{b0} \cdot \Delta \dot{\theta}_1 = \\
= U_0 \cdot \sin \theta_{10} \cdot \Delta \theta_1 - \Delta U \cdot \cos \theta_{10}, \\
r_b \cdot \Delta i_b + L_b \cdot \dot{\Delta i}_b = \Delta U_b + k_H \cdot \dot{\Delta I}_d, \\
\Delta U_b = \frac{k \cdot \Delta U}{(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p) \cdot (1 + T_3 p)},
\end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь подлежащими определению независимыми переменными являются:

$$\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3, \Delta \theta_4, \Delta \theta_5, \Delta I_d, \Delta I_q, \Delta i_b;$$

ΔU - изменение напряжения на выводах генератора задается как импульсное воздействие $\Delta U = A_1 \cdot \sin(A_2 \cdot t) \cdot e^{-A_3 t}$

Здесь A_1, A_2, A_3 - коэффициенты импульсного сигнала, задаются произвольно.

Для решения используется численный метод Рунге-Куте четвертого-пятого порядка. Для получения постоянных значений стационарного режима и коэффициентов в уравнениях использованы стандартные справочные данные для генератора ТВВ-320-2 и системы АРВ, коэффициенты A_1, A_2, A_3 задаются произвольно. Некоторые результаты представлены в виде графиков:

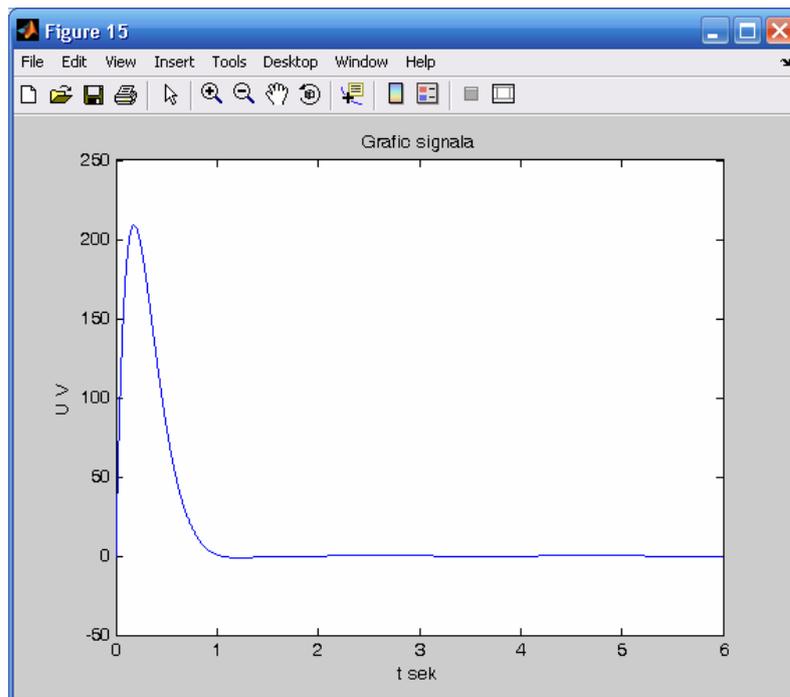


Рис.1. График сигнала

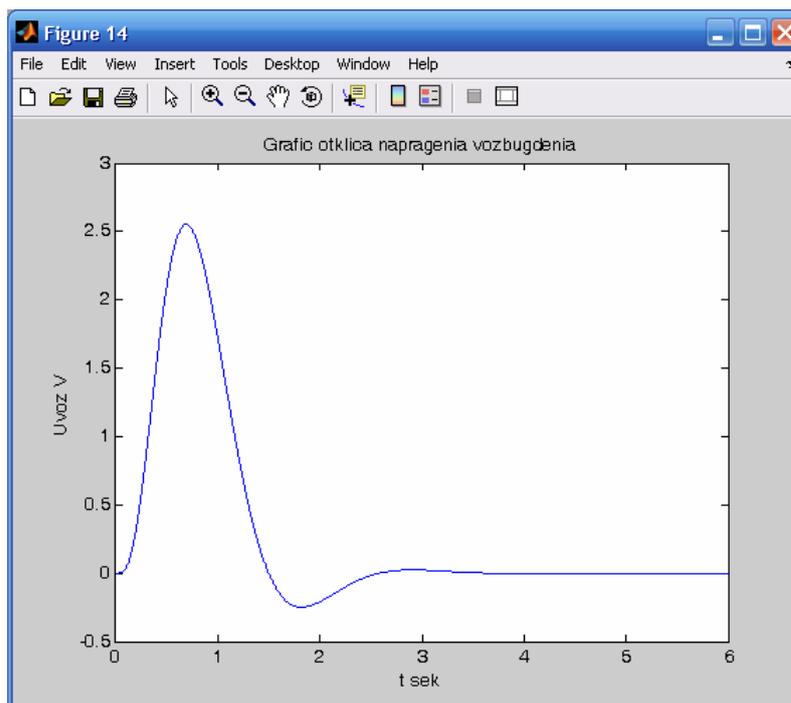


Рис.2. График отклика напряжения в обмотки возбуждения

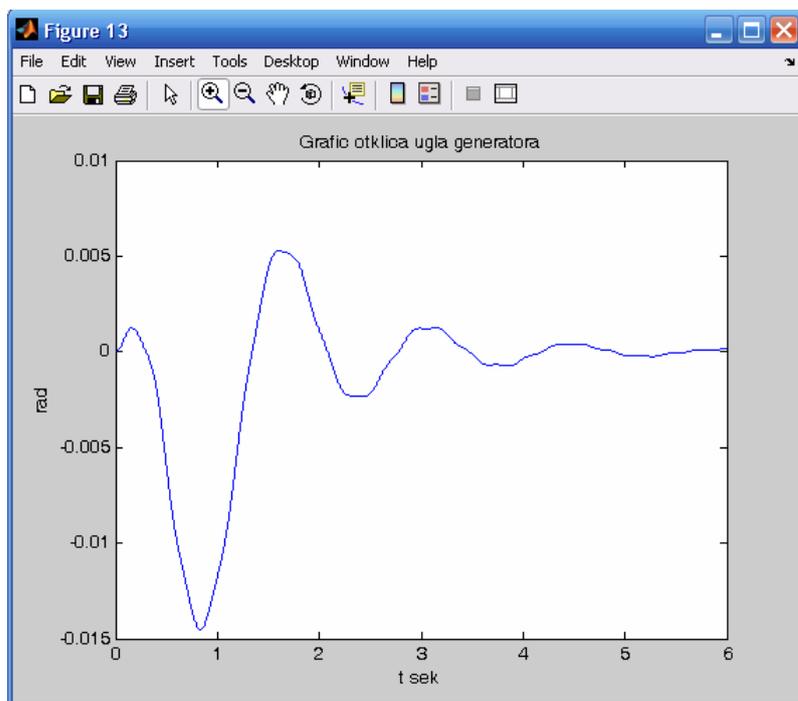


Рис.3. График отклика угла вращения генератора на сигнал

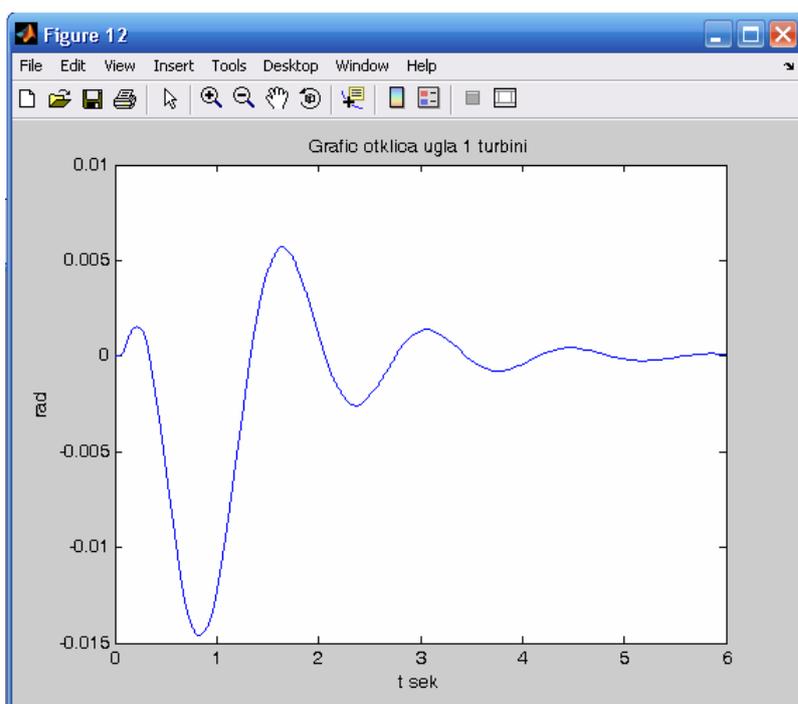


Рис.4. График отклика угла вращения турбины высокого давления на сигнал

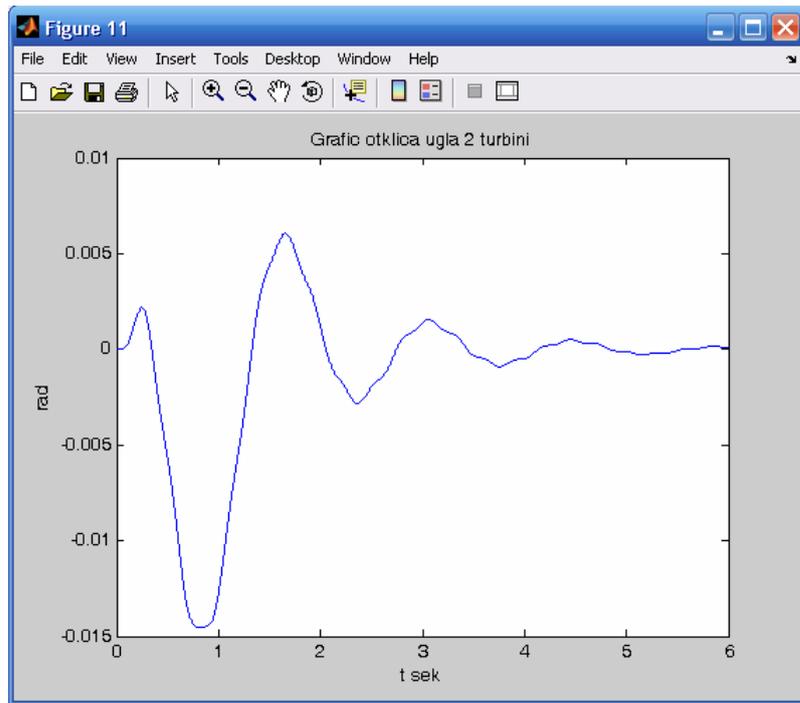


Рис.5. График отклика угла вращения турбины среднего давления на сигнал

Список литературы:

1. Костюк О.М., Соломаха М.И. Колебания и устойчивость синхронных машин; АН УССР, Ин-т электродинамики. - Киев: 1991г, 200с.
2. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем; издание 2 переработанное М., издательство "Машиностроение" 1970г, 737с.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах; издание 3 переработанное М.: Высшая школа, 1978г, 415с.
4. Амосов А.А., Дубинский Ю.Ф., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров; Учеб. пособие.- М.: Высшая школа, 1994г, 544с.