

**ДЖОЛДОШОВ Б. О., САРТОВ Т. Э., ТЕМИРКУЛОВА Н. Т.**

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
ГИДРОГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ВОЗМУЩЕНИЙ**

**Аннотация.** Рассматривается задача управления объектом в условиях неконтролируемых внешних воздействий. Целью управления является обеспечение заданных границ выходов системы автоматического управления.

**Ключевые слова:** гидрогенератор, регулятор, синтез систем автоматического управления.

**DZOLDOSHOV B. O., SARTOV T. E., TEMIRKULOVA N. T.**

**DYNAMIC DESIGN OF HYDROGENERATOR CONTROL DEVICE  
UNDER EXTERNAL INFLUENCES**

**Abstract.** The problem of an object control under uncontrolled external influences is considered. The purpose of the control is to provide the specified limits of the outputs of the automatic control system.

**Keywords:** hydrogenerator, regulator, synthesis of automatic control system.

**Введение.** Проблемы эффективного управления агрегатами (и генераторами) являются весьма актуальными, чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующих в энергетике методов и подходов автоматического управления. В настоящее время возникла необходимость в разработке новых методов и алгоритмов управления, которые обеспечивали бы надежную генерацию электроэнергии нужного качества с одновременной минимизацией ее себестоимости. Для эффективного управления гидроагрегатами необходимо рассматривать их нелинейные модели с учётом неопределенных и неконтролируемых внешних возмущений и проводить синтез и проектирование САУ (систем автоматического управления) совершенно новыми методами и алгоритмами, которые в наиболее полной мере позволят учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов.

Физическую сущность многих современных технических систем, в том числе и генераторов энергосистем, составляют колебательные процессы. Колебательные режимы могут быть как полезными, так и вредными. В отношении генераторов крайне нежелательными колебательными режимами являются самораскачивание и самовозбуждение, т.к. они приводят к возникновению нарастающих незатухающих колебаний, т.е. к нарушению устойчивости. Особенно важным случаем являются внешние низкочастотные гармонические возмущения, действующие на генераторы со стороны

энергосистемы. Возмущения со стороны электроэнергетической системы (ЭЭС) способствуют появлению системных колебаний, что, в свою очередь, может привести к нарушению устойчивости ЭЭС, асинхронному ходу и развитию системной аварии [1; 4].

**Математическая модель объекта управления.** Математическая модель гидроагрегата, работающего на систему неограниченной мощности в пространстве состояний, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в виде [1; 3; 4]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3x_4 + b_{11}U_\infty \sin(x_5) + b_{12}u_1 + \xi_1; \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3x_4 + b_{21}U_\infty \sin(x_5) + b_{22}u_1 + \xi_1; \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1x_4 + a_{32}x_2x_4 + a_{33}x_3 + b_{31}U_\infty \cos(x_5) + \xi_1; \\ \dot{x}_4 = a_{41}(x_6 + a_{42}x_1x_3 - (a_{43}x_1 + a_{44}x_2)x_3 - Dx_4) + \xi_2; \\ \dot{x}_5 = x_4 - \omega_{nom}; \\ \dot{x}_6 = 2/T_\omega(-x_6 - x_7 - T_\omega(1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2)); \\ \dot{x}_7 = (1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2); \\ \dot{x}_8 = \xi_2; \\ \dot{x}_9 = s * \xi_1. \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты дифференциального уравнения объекта управления, связанные с параметрами статора и ротора синхронного генератора [1]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(r+R_e)/C; a_{12} = (kM_f r_f)/(L_f C); a_{13} = (L_e - L_q)/C; b_{11} = 1/C; b_{12} = kM_f/(L_f C); \\ a_{21} &= -kM_f(R_e + r)/(L_d B); a_{22} = -r_f/B; a_{23} = -kM_f(L_e + L_q)/(L_d B); b_{21} = -kM_f/(L_d B); \\ b_{22} &= -1/B; a_{31} = -(L_e + L_q)/L_q; a_{32} = -kM_f/L_q; a_{33} = -(r + R_e)/L_q; b_{31} = -1/L_d; \\ a_{41} &= 1/H; a_{42} = L_q/H; a_{43} = L_d/H; a_{44} = kM_f/H; a_{61} = -2/T_\omega; a_{62} = 2/T_s - 2/T_\omega; \\ a_{62} &= 2/T_s - 2/T_\omega; b_{61} = -2m_0/T_s; b_{62} = -2/T_s; a_{71} = -1/T_s; a_{72} = m_0/T_s; b_{72} = 1/T_s. \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} C &= 0,3417; B = -0,3627; a_{11} = -2,4926; a_{12} = 9,7561 \times 10^{-4}; a_{13} = -1,0039; b_{11} = 2,9268; \\ b_{12} &= 2,4390; a_{21} = 2,0772; a_{22} = 0,0011; a_{23} = 3,4073; b_{21} = 2,439; b_{22} = 2,7572; a_{31} = -1,6057; \\ a_{32} &= 1,3218; a_{33} = -0,9789; b_{31} = -1,1494, \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned} L_d &= 1,3; L_q = 0,87; r = 0,00165; L_f = 1,38; r_f = 0,0004; kM_f = 1,15; H = 5; T_\omega = 4; T_s = 1; \\ m_0 &= 0,5; \omega_{nom} = 1; D = 1; R_e = 0,85; L_e = 0,527; U_\infty = 1; K = \sqrt{3}U_\infty. \end{aligned}$$

Нелинейная вектор-функция  $F(x)$ , матрица управления  $B$ , а также вектор неопределённых возмущений имеют вид:

$$F(x) = [F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_9)]^T, \quad B = [b_{12} \ 0; b_{22} \ 0; 0 \ 0; 0 \ 0; 0 \ 0; 0 \ 0; 0 \ b_{62}; 0 \ b_{72}; 0 \ 0; 0 \ 0];$$

$$\xi = \xi(t) = [\xi_1; \xi_1; \xi_1; \xi_2; 0; 0; 0; \xi_2; s * \xi_1],$$

$$F_1(x) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3x_4 + b_{11}U_\infty \sin(x_5), \quad F_2(x) = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3x_4 + b_{21}U_\infty \sin(x_5),$$

$$F_3(x) = a_{31}x_1x_4 + a_{32}x_2x_4 + a_{33}x_3 + b_{31}U_\infty \cos(x_5), \quad F_4(x) = a_{41}(x_6 + a_{42}x_1x_3 - (a_{43}x_1 + a_{44}x_2)x_3 - Dx_4),$$

$$F_5(x) = x_4 - \omega_{nom}, \quad F_6(x) = 2/T_\omega(-x_6 - x_7 - T_\omega(1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2)),$$

$$F_7(x) = (1/T_s)(-x_7 + m_0 + u_2), \quad F_8(x) = 0; F_9(x) = 0.$$

где:  $s = (x_4 - \omega_{nom}) / \omega_{nom}$  – скольжение, переменные вектора состояния;  $x_1 = x_1(t) = I_d(t)$ ,  $x_3 = x_3(t) = I_q(t)$  – токи статора по продольным и поперечным осям  $d, q$ , соответственно;  $x_2 = x_2(t) = I_f(t)$  – ток возбуждения ротора;  $x_4 = x_4(t) = \omega(t)$ ,  $x_5 = x_5(t) = \delta(t)$  – частота вращения ротора и электрический угол;  $x_6 = x_6(t) = P_t(t)$  – механическая мощность на валу генератора;  $x_7 = x_7(t) = m(t)$  – величина открытия водяного шлюза;  $x_8 = \xi_1 = \xi_1(t)$ ,  $x_9 = \xi_2 = \xi_2(t)$  – переменные состояния модели возмущений;  $u_1 = U_f = U_f(t)$  – напряжение возбуждения ротора (управления синхронного генератора);  $u_2 = U_1 = U_1(t)$  – перемещение сервопривода (управление гидротурбиной);  $D$  – демпферный коэффициент [1]. Выберем  $D=1$ ;  $x = [x_1, x_2, \dots, x_9]^T = [i_d, i_f, i_q, \omega, \delta, P_m, m, \xi_1, \xi_2]^T$  – вектор переменных состояния, характеризующих токи по соответствующим обмоткам генератора.

**Постановка задачи.** Рассмотрим объект управления, описываемый векторно-матричным дифференциальным уравнением в пространстве состояний

$$\dot{x}(t) = F(x) + Bu(t) + \xi(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad (2)$$

где  $x \in R^n$  – вектор состояния объекта;  $u \in R^m$  – вектор управления;  $F(x) = \{F_i(x)\} \in R^n$  – нелинейная вектор-функция;  $B = \{b_{iv}\} \in R^{n \times m}$  – вещественная матрица;  $t_0, t_k$  – начальный и конечный моменты управления;  $R^n - n$  – мерное векторное арифметическое пространство. Будем предполагать, что вектор возмущения  $\xi(t)$  не определен и не измеряется.

Требуется определить алгоритм управления  $u = u(x, t)$  объектом, состояния которого описываются векторным дифференциальным уравнением (2), обеспечивающим выполнение требования к качеству процессов управления:

$$|x_i(t)| \leq \bar{\sigma}_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

**Метод синтеза САУ (построение алгоритмов управления).** Решение сформулированной задачи синтеза будем осуществлять на основе подхода критерия допустимости управления [4; 5]. В соответствии с этим подходом для гарантированного обеспечения критериальных ограничений (3) достаточно выполнения неравенств

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \cdot \dot{x}_i(\tau) d\tau \leq \int_{t_0}^t \bar{\sigma}_i(\tau) \cdot \dot{\bar{\sigma}}_i(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k]. \quad (4)$$

В целях использования соотношений (4) для синтеза необходимого закона управления  $u(t)$  уравнение объекта (2) представим в координатной форме:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^n F_i(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

С учетом уравнений (5) соотношения (4) имеют вид:

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \left( \sum_{j=1}^n F_j(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(\tau) + \xi_i(\tau) \right) d\tau \leq \Gamma_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где  $\Gamma_i(t) = \int_{t_0}^t \bar{\sigma}_i(\tau) \dot{\bar{\sigma}}_i(\tau) d\tau.$

Пусть каждая координата вектора управляющих воздействий  $u(t)$  состоит из двух частей:

$$u_\ell(t) = \hat{u}_\ell(t) + \tilde{u}_\ell(t), \quad \ell = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Для определения компонентов управления составим соотношения вида

$$\sum_{i=1}^n F_i(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \hat{u}_\ell = \gamma_i x_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Введем обозначения

$$Z_i(t) = \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \tilde{u}_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Для определения компонентов управления  $\tilde{u}_\ell(t)$  положим, что

$$\dot{Z}_i(t) = \alpha_i^{-1} x_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

С учетом соотношений (8), (9) и (10) неравенства (6) преобразуются к виду

$$\gamma_i \int_{t_0}^t x_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \dot{Z}_i(\tau) \leq \Gamma_i(t). \quad (11)$$

Можно показать, что  $\frac{Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)}{2} = \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \cdot \dot{Z}_i(\tau) d\tau$ .

В результате условия (11) запишутся в виде

$$\gamma_i \int_{t_0}^t x_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t). \quad (12)$$

Определим параметры  $\gamma_i, \alpha_i$ . Легко показать, что при касании кривой функций  $x_i(t)$  на верхней  $\bar{b}_i(t)$  и нижней  $-\bar{b}_i(t)$  границах, внутри которых должен находиться переходный процесс  $x_i(t)$ , должны выполняться неравенства

$$\gamma_i \int_{t_0}^t \sigma_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t), \quad i = \overline{1, n},$$

что эквивалентно условиям

$$\alpha_i [Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)] \leq \Gamma_i(t) - \gamma_i \int_{t_0}^t \sigma_i^2(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Отсюда видно, что если параметры  $\gamma_i$  выбрать так, чтобы правые части соотношений (13) принимали положительные значения, а параметры  $\alpha_i$  задать так, чтобы левые части неравенств (10) были отрицательными, то условия допустимого качества управления (4) будут выполняться для всех  $t \in [t_0, t_k]$ . Таким образом, параметры  $\gamma_i$  определяются из условия

$$\int_{t_0}^t \bar{b}_i(\tau) \cdot \dot{\bar{b}}_i(\tau) d\tau - \gamma_i \int_{t_0}^t \bar{b}_i^2(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

В последнем случае

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_{i1}, & \text{если } Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0) \leq 0, \\ \alpha_{i2}, & \text{если } Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0) > 0, \end{cases}$$

где вещественные числа  $\alpha_i$  функций  $Z_i(t)$  определяются как решения уравнений (10). При выборе  $Z_i(t) = 0$ , очевидно, что  $Z_i^2(t) \geq 0$ , что облегчает определение параметров  $\alpha_i$ . При этом необходимо, чтобы  $\alpha_i \leq 0$ .

Таким образом, выбор параметров  $\gamma_i, \alpha_i, i = \overline{1, n}$ , определяет качество управления (4).

Поэтому из уравнений (8) определяем первую составляющую вектора управления  $\hat{u} \in R^m$ :

$$B\hat{u}(t) = \gamma \cdot x(t) - F(x), \quad (15)$$

где матрица  $\gamma = \text{diag} \{ \gamma_i \}_{i=1}^n$ . Отсюда получаем, что

$$\hat{u}(t) = G(\gamma \cdot x(t) - F(x)), \quad \text{где } G = (B^T B)^{-1} B^T. \quad (16)$$

Здесь предполагается, что существует обратная матрица  $\det(B) \neq 0$ .

Далее с учетом условий (8) и соотношений (9) имеем, что

$$\sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \ddot{u}_\ell(t) + \dot{\xi}_i(t) = \alpha_i^{-1} x_i(t), \quad i = \overline{1, n},$$

или в векторной форме  $B \cdot \ddot{u}(t) = \alpha \cdot x(t) - \dot{\xi}(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , где матрица  $\alpha = \{ \alpha_i \}_{i=1}^n$ .

Из векторного уравнения определяем закон изменения второй составляющей закона управления  $\tilde{u}(t)$ :

$$\dot{\tilde{u}}(t) = G \cdot (\alpha^{-1} \cdot x(t) - \dot{\xi}(t)), \quad (17)$$

В результате для объекта (2) вектор управления

$$u(t) = \hat{u}(t) + \tilde{u}(t), \quad (18)$$

обеспечивающий выполнение условий заданного качества замкнутой системы, определяется на основе соотношений (16) и (17).

**Алгоритм управления гидрогенератором.** Алгоритм управления объектом (т.е. динамика синтезированного закона управления) согласно (6), (7) и (8) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} du_1 / dt = [ 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} (g_{11} \dot{x}_1 - a_{11} \dot{x}_1 - a_{12} \dot{x}_2 - a_{13} \dot{x}_3 \dot{x}_4 - b_{11} U_\infty \cos(x_5) \dot{x}_5) + \\ \quad + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{22} (g_{22} \dot{x}_2 - a_{21} \dot{x}_1 - a_{22} \dot{x}_2 - a_{23} \dot{x}_3 \dot{x}_4 - b_{21} U_\infty \cos(x_5) \dot{x}_5) + \\ \quad + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} / \alpha_{11} x_1 + 1 / (b_{12}^2 + b_{22}^2) b_{12} / \alpha_{22} x_2 ], \\ du_2 / dt = [ 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{62} (g_{66} \dot{x}_6 - a_{61} \dot{x}_6 - a_{62} \dot{x}_7 + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{72} (g_{77} \dot{x}_7 - a_{71} \dot{x}_7) + \\ \quad + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{62} / \alpha_{66} x_6 + 1 / (b_{62}^2 + b_{72}^2) b_{72} / \alpha_{77} x_7 ]; \end{array} \right. \quad (19)$$

где  $U_\infty$  – действующее значение напряжения.

**Переходные процессы САУ.** Далее на рисунках 1, 2, 3, 4 приведены полученные переходные процессы САУ при следующих параметрах настройки законов управления (19):

$$\alpha_{11} = -1; \quad g_{11} = -1; \quad \alpha_{ii} = \alpha_{11}; \quad g_{ii} = g_{11}; \quad i = \overline{2, 11}.$$

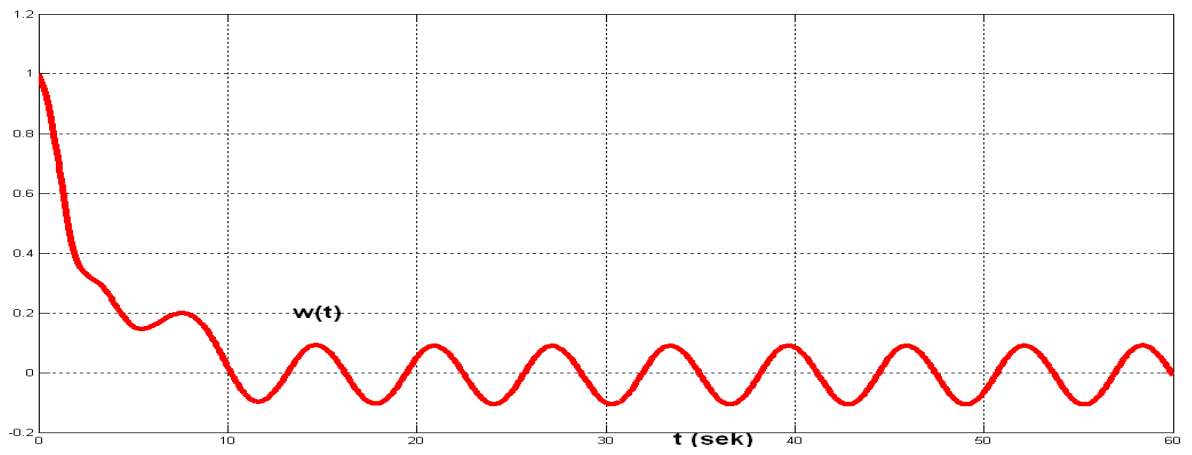


Рис. 1. Угловая скорость вращения ротора  $\omega(t)$

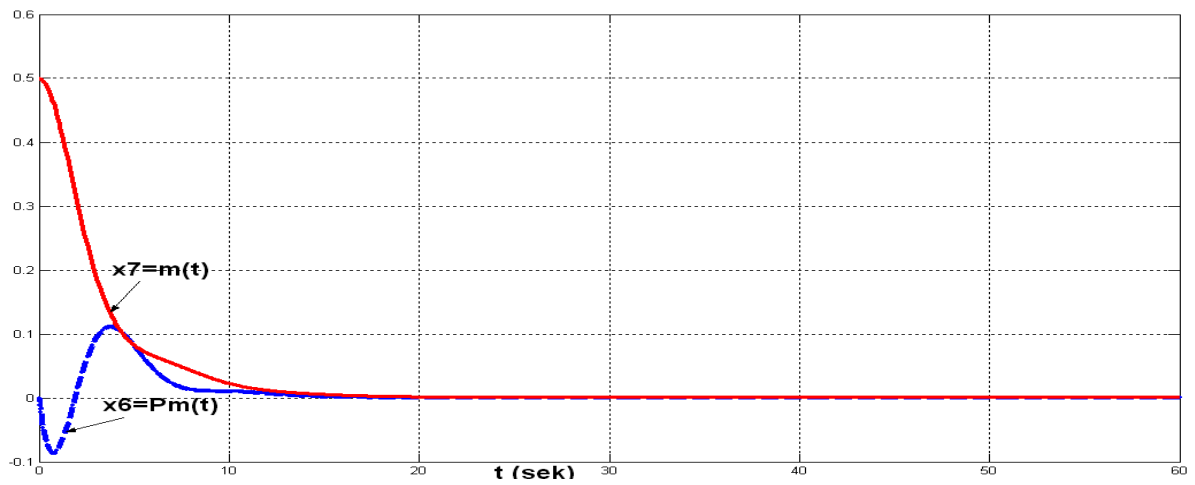


Рис. 2. Величина открытия водяного шлюза  $m(t) = x_7(t)$   
и механическая мощность на валу СГ  $P_m(t) = x_6(t)$ .

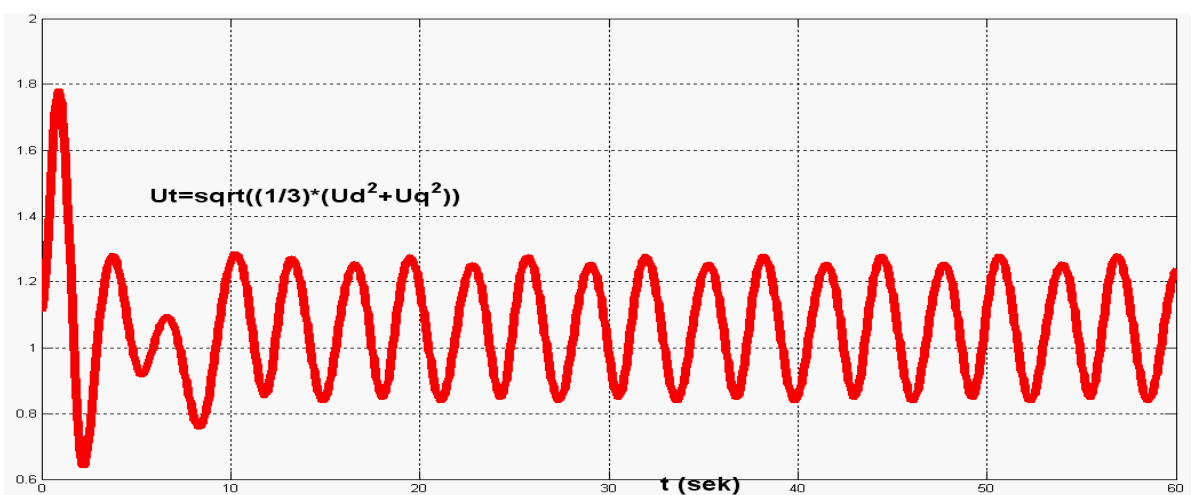


Рис. 3. Напряжение на шине синхронного генератора  $U_i(t)$

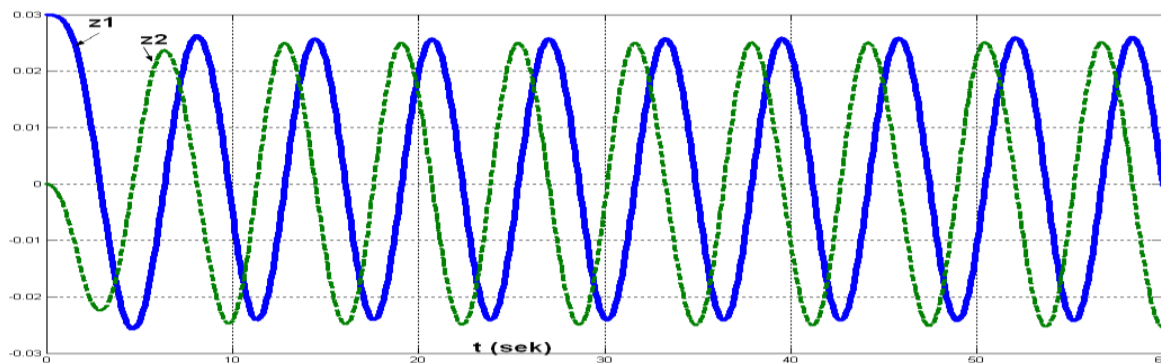


Рис. 4. Переменные модели возмущений.

**Выводы.** Разработан новый метод синтеза законов управления частотой и мощностью гидрогенератора и их групп в нелинейной постановке с учетом явлений взаимосвязанности, многомерности, нелинейности и с учетом неопределенных возмущений. На основе предложенного закона (алгоритмов) управления построены принципиально новые классы автоматических регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость замкнутых САУ («гидрогенератор + регулятор») и инвариантность к внешним возмущениям. Регуляторы, построенные по предлагаемым подходам, существенно превосходят по своим динамическим свойствам существующие типовые регуляторы, базирующиеся на идеологии линейной теории управления. Результаты компьютерного моделирования показали эффективность построенных регуляторов. В дальнейшем внедрение регуляторов в практику управления генераторами (энергоблоков) позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
2. Джолдошев Б. О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. – Бишкек: Илим, 2011. – 166 с.
3. Джолдошев Б. О., Темиркулова Н. Т. Динамическое проектирование адаптивного регулятора электроэнергетической системы // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. – 2016. – № 39, Т. 2. – С. 87–95.
4. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – М.: Едиториал, УРСС, 2005. – 222 с.
5. Biryukow V. F., Dzholdoshev B. O. Inequality method in a single problem of synthesis of adaptive control // Evaluation of adaptive control strategies, IFAC Workshop Series. Oxford. – 1989. – No.7. – pp. 137–142.