

Значения масс вероятности:

$$m(D) = (0,05; 0,0048; 0,00225; 0,118; 0,022; 0,0075; 0,03).$$

Значения нижних (степень доверия) и верхних (степень правдоподобия) границ интервалов точных значений вероятностей составляют:

$$bel(D) = (0,05; 0,0048; 0,00225; 0,1728; 0,07425; 0,05775; 1,0),$$

$$pl(D) = (0,98545; 0,97075; 0,8272; 0,99875; 0,9952; 0,95; 1,0).$$

Выводы

1. Приведен анализ информационно-системных и эвентологических методологий управления рисками изделий специального назначения на этапах жизненного цикла, способствующих принятию рациональных и эффективных конструкторско-технологических решений с точки зрения управления (минимизации) рисками.

2. На основе теории свидетельств Демпстера-Шейфера приведена оценка целесообразности использования в задачах управления рисками на этапах жизненного цикла информационных показателей с позиций конструирования, технологической подготовки производства, логистики.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51897-2011 Менеджмент риска. Термины и определения (дата введения в действие 01.12.2012).
2. ИСО 31000:2009 Менеджмент риска. Принципы и руководство.
3. Афанасьев А.С., Вященко Ю.Л., Иванов К.М., Матвеев С.А. Управление рисками изделий военного назначения на основе информационно-системного подхода. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2015
4. Труды V Всероссийской конференции по финансово-актуарной математике и смежным вопросам / под ред. О. Воробьева. - Ин-т вычислит. моделирования Краснояр. гос. ун-та, Краснояр. гос. торгово-эконом. ин-т; Сиб. ин-т бизнеса, управления и психологии. - Красноярск: Гротеск, 2006. - Ч. 1, 2.

УДК 681.5.01

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Оморов Туратбек Турсунбекович, д.т.н., проф., КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан

*Сартов Таштанбай Эсенович, к.т.н., доцент, КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044,
г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: ste-61@mail.ru*

*Джолдошев Бекболот Оморович, д.т.н., проф. КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044,
г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: bekbolot2009@yandex.ru*

*Темиркулова Наргис Темиркуловн, преп., КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044,
г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: nakush@mail.ru*

*Токтоналиева Диана Эркиновна, магистр КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044,
г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: artemida.alima@mfil.ru*

Цель статьи - разработка метода синтеза управляющего устройства гидроагрегата современными методами систем управления. Приводится постановка задачи синтеза. Предложен метод синтеза управляющего устройства, обеспечивающие прямые требования к качеству процессов управления. Синтезированная система автоматического управления (САУ) по предложенному алгоритму (закону) управления является наиболее приемлемой и преимущество САУ подтверждаются результатами их моделирования.

Ключевые слова: Гидроагрегат, турбина, генератор, объект управления, система автоматического управления, регулятор частоты вращения, регулятор возбуждения.

THE DYNAMIC DESIGN OF ADAPTIVE CONTROLLER OF POWER SYSTEM

Omorov T.O. Department of Information Technologies, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic

Sartov T.E. Department of Information Technologies, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, (Tel: +996 312 545173; e-mail: ste-61@mail.ru)

Dzholdoshov B.O. Department of Information Technologies, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, (Tel: +996 770 270157; e-mail: bekbolot2009@yandex.ru)

Temirkulova N.T. Department of Information Technologies, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov Bishkek, Kyrgyz Republic, (Tel: +996 702 943765; e-mail: nakush@mail.ru)

Toktonaliev D.E. Department of Information Technologies, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov Bishkek, Kyrgyz Republic, (Tel: +996 771 982955; e-mail: artemida.alima@mfil.ru)

The purpose of the article - to develop a method of synthesis of a control device hydroelectric modern methods of management. We present formulation of the synthesis problem. A method for the synthesis of control devices that provide direct claims to the quality control processes. Synthesized automatic control system (ACS) on the proposed algorithm (the law of) control is the most acceptable and the advantage of ACS confirmed by the results of their modeling.

Keywords: Hydraulic, turbine, generator, control object, automatic control system, speed control, field control.

Многие технические и технологические объекты относятся к классу многомерных, взаимосвязанных, нелинейных и нестационарных динамических систем. В общем случае гарантированное достижение основных целей управления на основе существующих методов затруднительно из-за сложности проблемы управления. Так, обеспечение требуемого уровня качества процессов управления и учет необходимых инженерных требований и технологических ограничений связаны с известными трудностями, в частности, с необходимостью многократного повторения процедур синтеза известных методов, решения краевых задач и выбора желаемого расположения полюсов проектируемой замкнутой системы. В основном, это вызвано тем, что при синтезе управляющих устройств часто используются обобщенные характеристики систем такие, как интегральные показатели, частотные и корневые критерии, которые дают не реальную, а косвенную оценку качества управления. Поэтому, для создания высококачественных и эффективных автоматических систем актуальной является проблема синтеза управляющих устройств (регуляторов) с использованием критериев, наиболее полно отражающих степень успешности достижения целей управления. Также можно отметить, что задача синтеза многомерных САУ является многокритериальной проблемой с векторными показателями качества, так как при этом необходимо учитывать целый ряд требований к проектируемым системам управления, основными из которых являются требования к устойчивости, точности и быстродействию. Формализация этих требований и решение соответствующих многокритериальных задач синтеза часто представляет собой чрезвычайно сложную проблему. Например, динамическое проектирование САУ на основе косвенных (интегральных, частотных, корневых) показателей качества приводит к многократному повторению процедур синтеза из-за отсутствия эффективных функциональных зависимостей между инженерными показателями и весовыми матрицами интегральных критериев качества (или корнями характеристического

уравнения замкнутой системы). В связи с этим актуальной является проблема совершенствования существующих и разработки новых принципов, методов и алгоритмов синтеза регуляторов САУ технологическими объектами по инженерным критериям качества, ориентированных на использование современных цифровых технологий [2,4].

Современные энергетические системы представляют собой комплекс различных динамических подсистем, выполняющих разнообразные технологические функции: это, во-первых, подсистема производства энергии, осуществляемого с помощью котлов, во-вторых, подсистема преобразования тепловой энергии в механическую, реализуемого с помощью турбоагрегатов, в третьих, подсистема генерации электрической энергии, осуществляемой с помощью синхронных генераторов электрической энергии. Т.о., возникает острая необходимость проведения фундаментальных научных исследований и опытно-конструкторских разработок, посвященных проблеме противоаварийного и энергосберегающего управления процессами производства тепловой и электрической энергии, т.е. поиску новых методов и алгоритмов управления, которые бы обеспечивали надежную генерацию электроэнергии нужного качества с одновременной минимизацией расхода энергоносителя и, следовательно, себестоимости электроэнергии [1, 3].

К важнейшим свойствам генераторов, являющихся неотъемлемой частью энергоблоков, относятся *нелинейность, многомерность и динамическая взаимосвязь между турбиной и синхронным генератором* как в составе отдельного агрегата, так и особенно между группой генераторов энергосистемы. Технологические процессы, протекающие в отдельных турбогенераторах, связаны между собой через общую нагрузку и через общую энергосеть электроэнергетической системы (ЭЭС). Традиционные методики построения алгоритмов управления ЭЭС обычно строятся по принципу т.н. «компенсации» нелинейностей моделей или их игнорирования, сепарирования имеющихся каналов управления, нейтрализации перекрестных связей и т.д. Подобные вынужденные искусственные приемы, вызванные ограниченными возможностями известных методов классической теории управления, в конечном итоге, весьма негативно сказываются на способность систем управления отвечать современным требованиям к ЭЭС с точки зрения качества производимой энергии, устойчивости ЭЭС и энергосбережения [4, 6, 7]. Традиционные алгоритмы управления ЭЭС сложились более полувека назад и используется поныне, хотя они явно устарели. Несомненно, в свое время они показали свою эффективность, но их применение во все более развивающейся и расширяющейся структуре энергетических систем порождает свои проблемы и требует их незамедлительного решения. Повышение требований к качеству работы турбогенераторов: устойчивости, расширение их функциональных возможностей, да и сама логика научно-технического прогресса обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления турбогенераторами. В этой связи в данной главе предлагается взглянуть на проблему управления турбогенераторами с точки зрения современной науки об управлении, т.е. с учетом нелинейности, многомерности и многосвязности их математических моделей и использования современных методов синтеза нелинейных систем взаимосвязанного управления [3].

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

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

где r_f, L_f, kM_f – параметры обмотки возбуждения СГ.

Коэффициенты д.у. объекта управления, связанные с параметрами статора и ротора СГ получены в результате построения математической модели агрегата и имеют вид:

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

или

$$\begin{aligned} C &= 0.3417; \quad B = -0.3627; \quad a_{11} = -2.4926; \quad a_{12} = 9.7561 \cdot 10^{-4}; \quad a_{13} = -1.0039; \\ b_{11} &= 2.9268; \quad b_{12} = 2.4390; \quad a_{21} = 2.0772; \quad a_{22} = 0.0011; \quad a_{23} = 3.4073; \quad b_{21} = 2.439; \\ b_{22} &= 2.7572; \quad a_{31} = -1.6057; \quad a_{32} = 1.3218; \quad a_{33} = -0.9789; \quad b_{31} = -1.1494; \end{aligned}$$

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 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 генератора соответственно; $x_6 = x_6(t) = P_i(t)$ –

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;

$u_1 = U_f = U_f(t)$ – напряжения возбуждения ротора (управления СГ), $u_2 = U_1 = U_1(t)$ –

перемещение сервопривода (управление гидротурбиной); D – демпферный коэффициент.

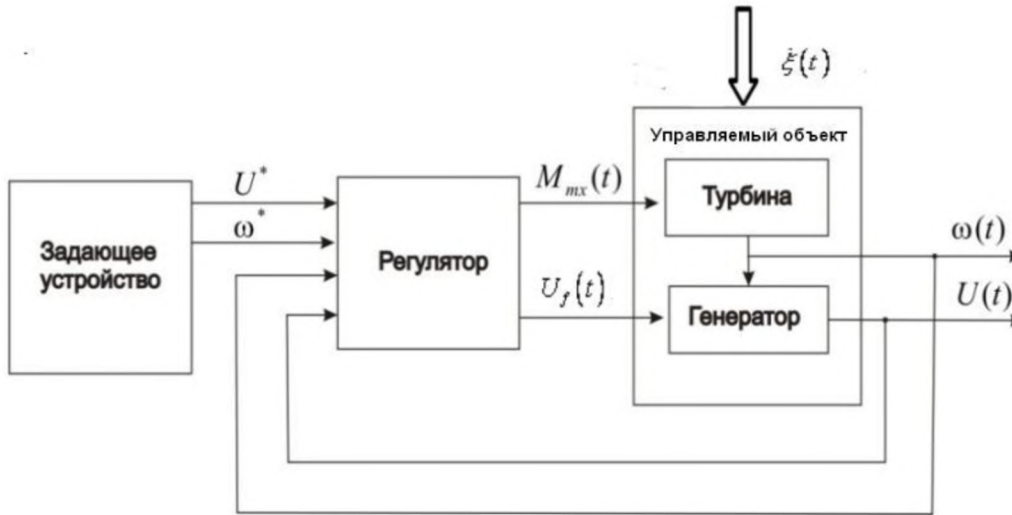


Рис. 1. Структура системы управления гидроагрегатом

U_∞ – действующее значение фазного напряжения. 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, характеризующие токи по соответствующим обмоткам генератора (топологию сети), $u_1 = U_f(t)$, $u_2 = U_1(t)$. Задача управления заключается в следующем: необходимо построить законы управления частотой и мощностью энергоблока, состоящего из генератора описываемыми вышеприведёнными дифференциальными уравнениями, которая обеспечивает стабилизацию частоту вращения и выходного напряжения.

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

$$\dot{x}(t) = F(x) + Bu(t) + \xi(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad (1)$$

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 относительно вектора возмущения $\xi(t)$ известна следующая информация: вектор $\xi(t)$ не определены и не измеряется;

Требуется определить алгоритм управления $u = u(x, t)$ объектом, состояния которой описывается векторным дифференциальным уравнением (1), обеспечивающего выполнения требования к качеству процессов управления:

$$|x_i(t)| \leq \bar{\delta}_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Синтез алгоритмов (законов) управления. Решение сформулированной задачи синтеза будем осуществлять на основе подхода критерия допустимости управления [2,4]. В соответствии с этим подходом для гарантированного обеспечения критериальных ограничений (2) достаточно выполнения неравенств

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \cdot \dot{x}_i(\tau) d\tau \leq \int_{t_0}^t \bar{\delta}_i(\tau) \cdot \dot{\bar{\delta}}_i(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k]. \quad (3)$$

В целях использования соотношений (3) для синтеза необходимого закона управления $u(t)$ уравнение объекта (1) представим в координатной форме:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n F_j(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

С учетом уравнений (4) соотношения (3) имеет вид:

$$\int_{t_0}^t x_i(\tau) \left(\sum_{j=1}^n F_j(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} u_\ell(\tau) + \xi_i(\tau) \right) d\tau \leq \Gamma_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

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

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

$$u_\ell(t) = \hat{u}_\ell(t) + \tilde{u}_\ell(t), \quad \ell = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Для определения компонентов управления составим соотношения вида

$$\sum_{i=1}^n F_i(x) + \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \hat{u}_\ell = \gamma_i x_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Введем обозначения

$$Z_i(t) = \sum_{\ell=1}^m b_{i\ell} \tilde{u}_\ell(t) + \xi_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

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

$$\dot{Z}_i(t) = \alpha_i^{-1} x_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

С учетом соотношений (7), (8) и (9) неравенства (5) преобразуются к виду

$$\gamma_i \int_{t_0}^t x_i^2(\tau) d\tau + \alpha_i \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \dot{Z}_i(\tau) d\tau \leq \Gamma_i(t). \quad (10)$$

Можно показать, что

$$\frac{Z_i^2(t) - Z_i^2(t_0)}{2} = \int_{t_0}^t Z_i(\tau) \cdot \dot{Z}_i(\tau) d\tau. \quad (11)$$

В результате условия (10) 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 γ_i, α_i . Легко показать, что при касании кривой функций $x_i(t)$ на верхней $\bar{\delta}_i(t)$ и нижней $-\bar{\delta}_i(t)$ границ, внутри которого 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 γ_i выбрать так, чтобы правые части соотношений (13) принимали положительные значения, а параметры α_i задать так, чтобы левые части неравенств (10) были отрицательными, то условия допустимого качества управления (3)

будут выполняться для всех $t \in [t_0, t_k]$. Таким образом, параметры γ_i определяются из условия

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

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 α_i функций $Z_i(t)$ определяются как решения уравнений (9). При выборе $Z_i(t) = 0$, очевидно, что $Z_i^2(t) \geq 0$, что облегчает определение параметров α_i . При этом необходимо, чтобы $\alpha_i \leq 0$.

Таким образом, выбором параметров $\gamma_i, \alpha_i, i = \overline{1, n}$, определяют качества управления (3). Поэтому из уравнений (7) 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

$$\hat{u}(t) = G(\gamma \cdot x(t) - F(x)), \quad (16)$$

где $G = (B^T B)^{-1} B^T$. Здесь предполагается, что существует обратная матрица $\det(B) \neq 0$.

Далее с учетом условий (7) и соотношений (8) имеем, что

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

или в векторной форме

$$B \cdot \dot{\tilde{u}}(t) = \alpha \cdot x(t) - \dot{\xi}(t), \quad i = \overline{1, n},$$

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 (2.1) вектор управления

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

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

Уравнения напряжений по продольной и поперечной осям d и q [1]:

$$\begin{cases} u_d = -K \cdot \sin \gamma + R_e \cdot i_d + L_e \cdot \frac{di_d}{dt} + \omega \cdot L_e \cdot i_q, \\ u_q = K \cdot \cos \gamma + R_e \cdot i_q + L_e \cdot \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L_e \cdot i_d. \end{cases}$$

Напряжения на шинах генератора определяется как

$$U_i = \sqrt{3(U_d^2 + U_q^2)};$$

$$L_d = 1.3; L_q = 0.87; r = 0.00165; L_f = 1.38; r_f = 0.0004; kM_f = 1.15; H = 5; Tw = 4;$$

$$Ts = 1; m0 = 0.5; \omega_{nom} = 1; D = 1; R_e = 0.85; L_e = 0.527; U_\infty = 1; K = \sqrt{3}U_\infty;$$

В данной работе разработаны программы, автоматизирующие синтез системы управления (в том числе и с предварительным автоматическим формированием управляющих воздействий на гидроагрегат), а также модель синтезированной системы управления на ППП Matlab.

Алгоритм управления объектом. Управляющие воздействия (т.е. алгоритм управления объектом) гидроагрегатом, имеет вид:

$$u(t) = \hat{u}(t) + \tilde{u}(t);$$

$$\text{где } \hat{u}(t) = G(Y \cdot x - F(x)), \quad \hat{u} = \hat{u}(t) = [\hat{u}_{11}; \hat{u}_{12}];$$

матрица

$$G = \begin{bmatrix} 1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{12}, & 1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{22}, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{62}, & 1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{72}, & 0 \end{bmatrix};$$

Тогда алгоритм управления объектом (т.е. динамика синтезированного закона управления) согласно (12) имеет вид:

$$\begin{aligned} du_1 / dt = & [1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{12}(g_{11}\dot{x}_1 - a_{11}\dot{x}_1 - a_{12}\dot{x}_2 - a_{13}\dot{x}_3\dot{x}_4 - b_{11}U_\infty \cos(x_5)\dot{x}_5) + \\ & + 1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{22}(g_{22}\dot{x}_2 - a_{21}\dot{x}_1 - a_{22}\dot{x}_2 - a_{23}\dot{x}_3\dot{x}_4 - b_{21}U_\infty \cos(x_5)\dot{x}_5) + \\ & + 1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{12} / \alpha_{11}x_1 + 1/(b_{12}^2 + b_{22}^2)b_{12} / \alpha_{22}x_2]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} du_2 / dt = & [1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{62}(g_{66}\dot{x}_6 - a_{61}\dot{x}_6 - a_{62}\dot{x}_7 + 1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{72}(g_{77}\dot{x}_7 - a_{71}\dot{x}_7) + \\ & + 1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{62} / \alpha_{66}x_6 + 1/(b_{62}^2 + b_{72}^2)b_{72} / \alpha_{77}x_7]; \end{aligned}$$

Полученные динамические характеристики САУ. Далее приведены полученные переходные процессы при значениях параметров настройки адаптивного регулятора:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} = -1; \quad g_{11} = -1; \quad \alpha_{ii} = \alpha_{11}; \quad g_{ii} = g_{11}; \quad i = \overline{2,11} \text{ и при начальных условиях} \\ \delta_0 = 0.4712, \quad I_{f0} = 1.75, \quad w_0 = 1, \quad P_{m0} = 0, \quad m_0 = 0.5, \quad \xi_{1_0} = 0.03, \quad \xi_{2_0} = 0, \quad U_{f0} = I_{f0}r_f; \\ x_0 = [0.86; I_{f0}; 0.52; w_0; \delta_0; P_{m0}; m_0; \xi_{1_0}; \xi_{2_0}; U_{f0}; 0] \end{aligned}$$

Они приведены на рис. 3-5.

Переходные процессы в промежутке при значениях параметров настройки адаптивного нелинейного регулятора:

$$\alpha_{11} = -0.1; \quad g_{11} = -10; \quad \alpha_{ii} = \alpha_{11}; \quad g_{ii} = g_{11}; \quad i = \overline{2,11}.$$

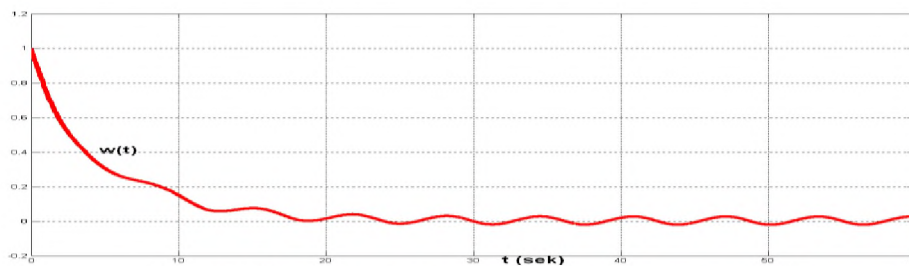


Рис. 2. Угловая скорость вращения ротора $\omega(t)$

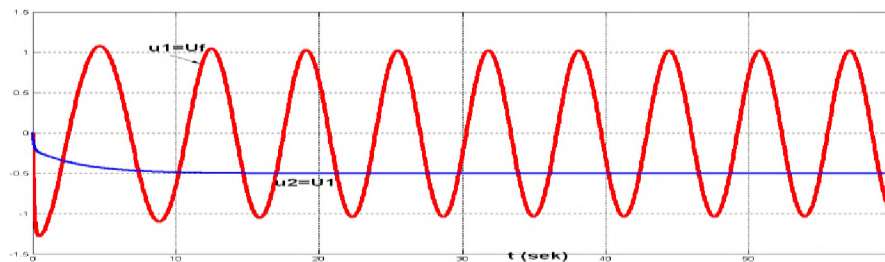


Рис. 3. Управляющие воздействия $u_1(t) = U_f(t), u_2(t) = U_1(t)$

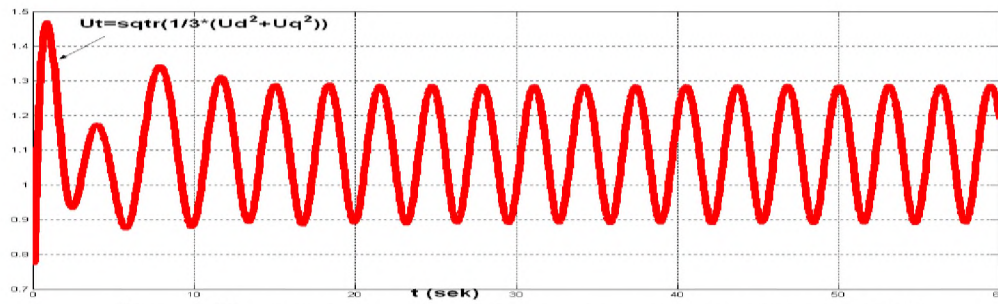


Рис. 4. Напряжения на шине синхронного генератора $U_1(t)$

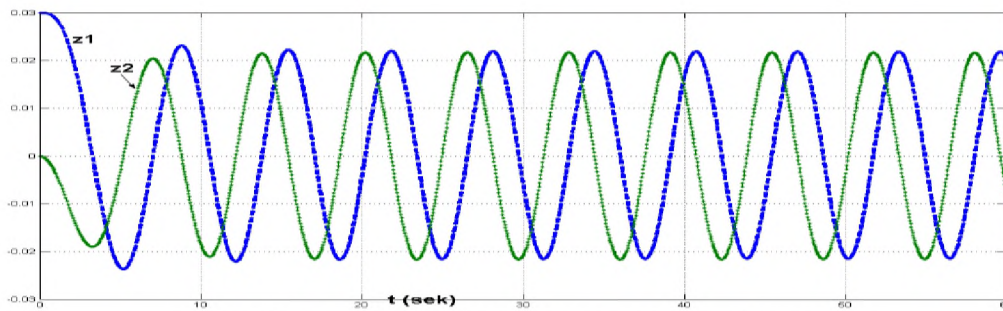


Рис. 5. Переменные модели возмущений $z_1(t), z_2(t)$

Выводы. Статья посвящена вопросам практического использования теоретических результатов. Приведены расчеты и компьютерное моделирование спроектированных систем управления агрегатом. Для её решения использован разработанный в статье алгоритм построения динамического регулятора.

Список литературы

1. Андерсон Н.Л., Фуад А. Управление электрическими системами и устойчивостью. М., Энергия, 1978.
2. Джолдошев Б.О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. - Бишкек: «Илим», 2011. - 166 с.
3. Колесников А.А. Синергетические методы управления системами: Энергетические системы, Едоториал, - 2005.
4. Оморов Т.Т. Принцип гарантируемый динамики в теории систем управления. Бишкек . Илим 2001, - 130с.