

РАСЧЕТ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

КОЖЕКОВА Г.А.
izvestiya@ktu.aknet.kg

Рассматривается задача управления многомерным линейным объектом. Предлагается метод синтеза адаптивной системы управления, который используется для построения контура адаптации синхронным генератором.

Эффективность энергосистемы во многом зависит от использования современных технологий, в частности, систем автоматического управления (САУ). В работах [1-3] выполнены расчеты по определению параметров регулятора синхронного генератора (СГ) на основе принципа гарантируемой динамики [1]. Научные основы динамического расчета систем управления, в частности, регуляторов СГ рассматривались в ряде работ [4-7]. Далее рассмотрим синхронную машину совместно с турбиной как объект управления, работающую на систему неограниченной мощности [4]. При этом демпфирующие факторы и активные сопротивления обмотки статора не учитываются. Предполагается, что генератор работает в симметричном режиме.

Задача динамического проектирования САУ синхронным генератором состоит в определении структуры и параметров регулятора, обеспечивающего поддержание компонентов вектора выхода СГ $y(t) = [U(t), \omega(t)]$ в соответствии с вектором задания $g = [U^*, \omega^*]$, где U^* , ω^* - требуемые значения напряжения на шинах генератора $U(t)$ и частоты вращения ротора $\omega(t)$ в момент времени t соответственно. В качестве управляющих воздействий на объект используются механический момент турбины $M_{MX}(t)$ и э.д.с. возбудителя $E_{FD}(t)$.

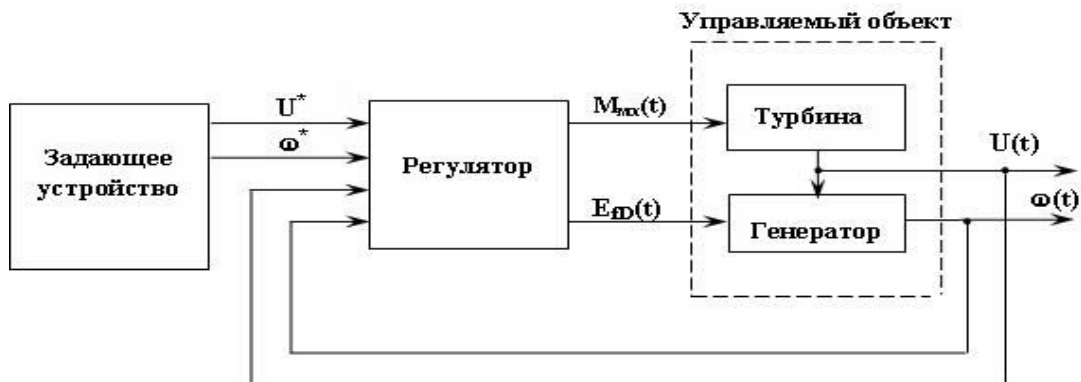


Рис. 1. Структура системы управления СГ

Динамические свойства синхронного генератора как объекта управления описывается следующей системой уравнений в отклонениях [4]:

$$\begin{aligned}
 \Delta U_q(t) &= k_5 \Delta \delta(t) + k_6 \Delta E_q'(t), \\
 \Delta \dot{E}_q'(t) &= a_1 \Delta E_q'(t) + a_2 \Delta \delta(t) + a_3 \Delta E_{FD}(t), \\
 \Delta \omega(t) &= a_4 \Delta E_q'(t) + a_5 \Delta \delta(t) + a_6 \Delta M_{MX}(t), \\
 \Delta \dot{\delta}(t) &= \Delta \omega(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Delta U(t)$, $\Delta E_q(t)$, $\Delta \omega(t)$, $\Delta \delta(t)$ - отклонения напряжения на шинах СГ, э.д.с. генератора, угловой частоты и угла расхождения векторов э.д.с. E_q и U от их установившихся (требуемых) значений;

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -\frac{1}{k_3 \tau_d}, & a_2 &= -\frac{k_4}{\tau_d}, & a_3 &= -\frac{1}{\tau_d}, \\
 a_4 &= -\frac{k_2}{\tau_j}, & a_5 &= -\frac{k_1}{\tau_j}, & a_6 &= \frac{1}{\tau_j}.
 \end{aligned}$$

Здесь k_1 – коэффициент, характеризующий изменение электрической мощности при изменении угла ротора в условиях постоянства потокосцепления по продольной оси, т.е. синхронизирующий момент;

k_2 – коэффициент, характеризующий изменение электрической мощности при изменении потокосцепления в условиях постоянства угла ротора;

k_3 – коэффициент сопротивления;

k_4 – коэффициент, характеризующий размагничивающее действие при изменении угла ротора (в установившемся режиме);

k_5 – изменение напряжения на шинах генератора при изменении угла ротора в условиях постоянства э.д.с. E' ;

k_6 – изменение напряжения на шинах генератора при изменении E' в условиях постоянства δ ;

τ_{d0} – постоянная времени СГ по продольной оси при разомкнутой обмотке статора;

τ_j – постоянная инерции.

Как известно [1], качество проектируемой САУ в общем случае определяется компонентами вектора

$$e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)]^T \text{ ошибки управления:}$$

$$e_i(t) = g_i(t) - y_i(t), \quad t \in [t_0, \infty),$$

$$i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где N – размерность вектора выхода $y(t)$ управляемого объекта; t_0 – начальный момент процесса управления; T – знак транспонирования.

Модель объекта управления в переменных состояния. Введем следующие обозначения:

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U(t) \\ \Delta \omega(t) \\ \Delta \delta(t) \end{bmatrix},$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_{fd}(t) \\ \Delta M_{mx}(t) \end{bmatrix},$$

где $e(t)$ – вектор состояния объекта; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий.

На основе уравнений синхронного генератора (1) в результате несложных преобразований получаем следующую модель СГ в переменных состояния в векторной форме:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t), \quad (3)$$

$$e(t_0) = e^0,$$

где матрицы $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$, $B = \{b_{iv}\}_{n \times m}$. Элементы матрицы B точно известны, а матрица A имеет параметрическую неопределенность, т.е. $\theta \in \Xi$, где ограниченное подмножество

$$\Xi = \left\{ \theta \in R^\mu : |\theta_i - \theta_i^*| \leq \Delta \theta_i, \quad i = \overline{1, \mu} \right\}; \quad (4)$$

θ_i^* – номинальное значение θ_i ; вектор-параметр объекта θ состоит из элементов A , т.е.

$$\theta = [a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{nn}].$$

Предполагается, что все компоненты вектора ошибки управления $e(t)$ доступны для измерения.

Пусть структура регулятора задается в виде линейной обратной связи. Тогда закон управления принимает следующий вид:

$$u(t) = K e(t), \quad (5)$$

где $K = \{k_{ij}\}_{n \times m}$ – матрица регулятора.

Задача синтеза адаптивной системы управления (рис.2) заключается в определении алгоритма работы адаптора, т.е. алгоритма самонастройки элементов матрицы $K(t)$ регулятора, обеспечивающего близость к нулю компонентом $e_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, вектора ошибки управления.



Рис.2. Структура адаптивной системы управления

Для решения сформулированной задачи будем использовать новый подход к синтезу многомерных систем управления, изложенный в [8, 9]. Как известно, в соответствии с этим подходом рассматриваются следующие критериальные функции:

$$J_i(t) = \int_{t_0}^t e_i(\tau) \dot{e}_i(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

При этом условия достижения цели управления даются следующей теоремой [8].

Теорема 1. Пусть $e_i(t_0) \neq 0$, $i = \overline{1, N}$, и для каждого t_0 и $t > t_0$ выполняются условия

$$\int_{t_0}^t e_i(\tau) \dot{e}_i(\tau) d\tau < 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Тогда модули невязок $|e_i(t)|$ с течением времени убывают и

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

В отличие от результатов, полученных в работе [9], функциональные соотношения (7) далее будут использованы для построения более простых уравнений, описывающих процесс адаптации параметров проектируемого регулятора.

Вначале с учетом модели объекта (3) и закона управления (5) запишем векторное уравнение замкнутой системы:

$$\dot{e}(t) = \Lambda e(t), \quad (8)$$

где матрица $\Lambda(t) = \{\lambda_{ij}(t)\}_{n \times n}$ с учетом (5) определяется соотношением

$$\Lambda(t) = A + BK(t). \quad (9)$$

В координатной форме уравнение (8) имеет вид:

$$\dot{e}_i(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(t) e_j(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Сформулированная задача адаптивного управления решается в два этапа: на первом этапе на основе критериальных соотношений (7) определяются уравнения настройки элементов матрицы $\Lambda(t)$, а на втором – уравнения адаптации параметров регулятора $k_{ij}(t)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Критериальные функции $J_i(t)$ с учетом (10) определяются следующей формулой:

$$J_i(t) = \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^t \lambda_{ij} e_i(\tau) e_j(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t \lambda_{ii} e_i^2(\tau) d\tau + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \int_{t_0}^t \lambda_{ij}(\tau) e_i(\tau) e_j(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

т.е.
$$J_i(t) = \hat{J}_i(t) + \tilde{J}_i(t),$$

где
$$\hat{J}_i(t) = \int_{t_0}^t \lambda_{ii} e_i^2(\tau) d\tau,$$

$$\tilde{J}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \int_{t_0}^t \lambda_{ij}(\tau) e_i(\tau) e_j(\tau) d\tau.$$

Очевидно, что если

$$\hat{J}_i(t) < 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$\tilde{J}_i(t) < 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

то гарантированным образом обеспечивается выполнение критериальных условий (7).

Пусть диагональные элементы матрицы $\Lambda(t)$ являются постоянными ($\lambda_{ii} = \text{const}$) и имеют отрицательные значения, т.е. $\lambda_{ii} < 0, \quad i = \overline{1, n}$. Тогда функции $\hat{J}_i(t)$ будут удовлетворять ограничениям (12). Теперь найдем условия, при выполнении которых будут выполняться соотношения (13). Для этой цели потребуем, чтобы динамика недиагональных элементов λ_{ij} матрицы Λ описывалась следующими уравнениями:

$$\dot{\lambda}_{ij}(t) = \alpha_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (14)$$

С учетом соотношений (14) выражения для $\tilde{J}_i(t)$ имеют вид

$$\tilde{J}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \alpha_{ij} \int_{t_0}^t \lambda_{ij}(\tau) \dot{\lambda}_{ij}(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, n}. \quad (15)$$

Можно показать, что справедливо следующее соотношение [6]:

$$\int_{t_0}^t \lambda_{ij}(\tau) \dot{\lambda}_{ij}(\tau) d\tau = 0,5[\lambda_{ij}^2(t) - \lambda_{ij}^2(t_0)], \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (16)$$

С учетом (16) выражение (15) можно записать в виде

$$\tilde{J}_i(t) = 0,5 \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} [\lambda_{ij}^2(t) - \lambda_{ij}^2(t_0)],$$

$$i = \overline{1, n}. \quad (17)$$

Пусть $\lambda_{ij}(t_0) = 0, \quad i \neq j$. Тогда, из выражения (17) для функции $\tilde{J}_i(t)$ видно, что условия (13) выполняются, если

$$\alpha_{ij} < 0, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (18)$$

Составим $n \times n$ - матрицу

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 & f_{11}(t) & f_{12}(t) & \dots & f_{1n}(t) \\ f_{21}(t) & 0 & f_{22}(t) & \dots & f_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n1}(t) & f_{n2}(t) & f_{n3}(t) & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где элементы $f_{ij}(t)$ определяются правой частью уравнений (14):

$$f_{ij}(t) = \alpha_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (19)$$

Тогда векторное уравнение самонастройки параметров замкнутой САУ можно записать в виде

$$\dot{\Lambda}(t) = F(t), \quad t \in [t_0, \infty), \quad (20)$$

$$\Lambda(t_0) = \Lambda^0,$$

где матрица начальных условий

$$\Lambda^0 = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{22}^0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{nn}^0 \end{bmatrix}.$$

При этом $\lambda_{ii}^0 < 0, \quad i = \overline{1, n}$.

Отметим, что построение матрицы $\Lambda(t)$ замкнутой системы на основе векторного уравнения (20) обеспечивает выполнение критериальных соотношений (7), т.е. убывание ошибок управления $e_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, к нулю.

Дифференцирование левой и правой частей матричного соотношения (9) позволяет получить следующее векторное соотношение:

$$\dot{\Lambda}(t) = B\dot{K}(t), \quad (21)$$

которое необходимо для построения алгоритма работы адаптора.

Полученный результат можно сформулировать с учетом соотношения (20) в виде следующей теоремы.

Теорема 2. Пусть управляемый объект, адаптивный регулятор и замкнутая система управления описываются соответственно уравнениями (3), (5) и (8). Тогда критериальные условия (7) выполняются, если уравнение синтеза законов адаптации параметров регулятора описывается следующим матричным соотношением:

$$B\dot{K}(t) = F(t). \quad (22)$$

При решении матричного уравнения (22) необходимо учитывать соотношения между размерностями векторов ошибки $e(t)$ и управления $u(t)$.

Предположим, что $n=m$ и квадратная матрица B имеет обратную матрицу B^{-1} . Тогда решение уравнения (22) определяется в явной форме:

$$\dot{K}(t) = B^{-1}F(t). \quad (23)$$

В случае, когда матрица B является неквадратной, можно определить квазирешение

$$\dot{K} = CF(t), \quad (24)$$

где $C = (B^T B)^{-1} B^T$.

Процесс адаптации системы, определяемый уравнением (23) или (24), обеспечивает сходимость процесса самонастройки параметров к желаемой матрице регулятора $K^* = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t)$ и выполнения цели управления.

Теперь изложенный выше метод синтеза будем использовать для построения алгоритма адаптивного управления СГ. При этом матрица регулятора

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \end{bmatrix},$$

а компоненты закона управления

$$u_1(t) = k_{11}e_1(t) + k_{12}e_2(t) + k_{13}e_3(t), \quad (25)$$

$$u_2(t) = k_{21}e_1(t) + k_{22}e_2(t) + k_{23}e_3(t).$$

Недиагональные элементы матрицы $F(t)$ вычисляем по формуле (19) при $n=3$.

Моделирование синтезированной САУ выполнено путем решения векторного уравнения (24) при следующих значениях параметров СГ:

$$K_1 = 1,8; \quad K_2 = 2,6; \quad K_3 = 0,3; \quad K_4 = 1,74; \quad K_5 = 0,04; \quad K_6 = 0,5;$$

$$\tau_{do} = 5,9 \text{ сек}; \quad \tau_j = 4,74 \text{ сек};$$

$$a_1 = -0,56; \quad a_2 = -0,29; \quad a_3 = -0,17; \quad a_4 = -0,27; \quad a_5 = -0,38; \quad a_6 = 0,21.$$

При этом матрицы:

$$B = \begin{bmatrix} -0,34 & 0 \\ 0 & 0,211 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -2,9412 & 0 & 0 \\ 0 & 4,7416 & 0 \end{bmatrix}.$$

Пусть заданы следующие параметры матрицы A с учетом их неопределенности, т.е. $\theta \in \Xi$, где

$$\theta^* \left[\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*, \dots, \theta_8^* \right] \left[a_{11}^*, a_{12}^*, \dots, a_{33}^* \right] \left[-0,565, -0,004, -0,756, -0,5316, 0, -0,401, 0, 1, 0 \right],$$

$$\Delta\theta_i = 1,4 \cdot \theta_i^*, \quad i = \overline{1,8}.$$

Далее синтез регулятора СГ осуществляется с применением вышеизложенного метода. Для обеспечения приемлемого качества процессов адаптивного управления выбраны следующие настроечные параметры регулятора:

$$\alpha_{1\overline{1}} = -5; \alpha_{1\overline{2}} = -10; \alpha_{1\overline{3}} = -0,5; \alpha_{2\overline{1}} = -8; \alpha_{2\overline{2}} = -20; \alpha_{2\overline{3}} = -3; \alpha_{3\overline{1}} = -6; \alpha_{3\overline{2}} = -7; \alpha_{3\overline{3}} = -9.$$

Компьютерное моделирование синтезированной адаптивной системы управления СГ выполнено с использованием программной системы MATLAB/Simulink, результаты которого приведены на рис.3 и на рис. 4.

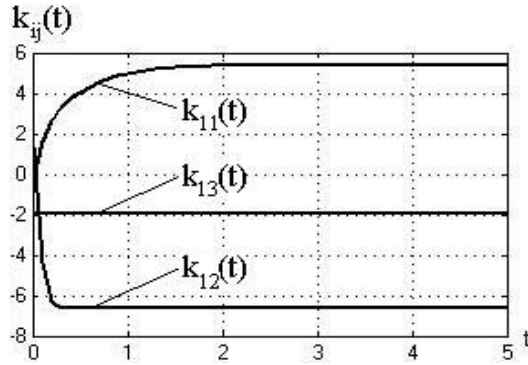


Рис.3. Динамики параметров

$$k_{11}(t), k_{12}(t), k_{13}(t).$$

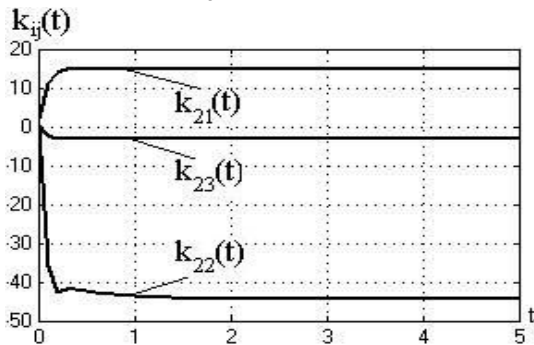


Рис.4. Динамики параметров

$$k_{21}(t), k_{22}(t), k_{23}(t).$$

Результаты построения переходных процессов по ошибке управления в синтезированной САУ СГ при различных начальных условиях показаны на рис.5-7.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что синтезированный адаптивный регулятор СГ обеспечивает достижения заданной цели управления.

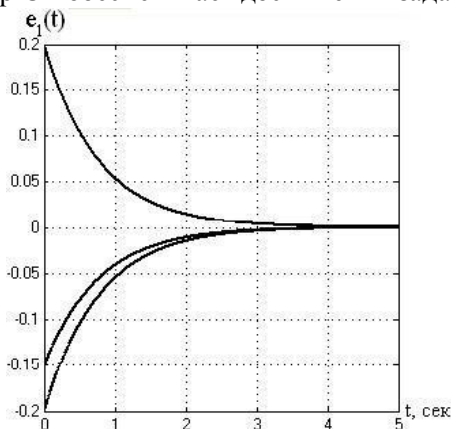


Рис.5. Переходный процесс по $e_1(t)$

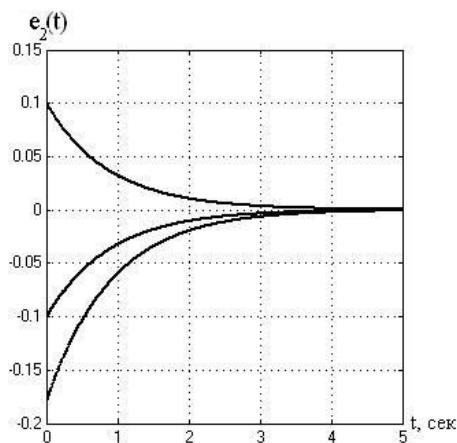


Рис.6. Переходный процесс по $e_2(t)$

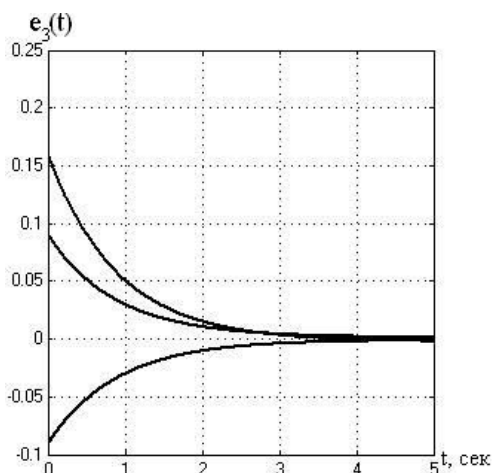


Рис.7. Переходный процесс по $e_3(t)$

Литература

1. Оморов Т.Т., Курманалиева Р.Н. Многокритериальный синтез систем управления по показателям качества и сложности. – Б.: Илим, 2007. – 136 с.
2. Оморов Т.Т., Тыныстановна Ж.М. Синтез структуры и параметров регулятора системы возбуждения синхронного генератора // Труды межд. конф. Энергосбережение – проблемы, современные технологии и управление. – Бишкек, 2003. С. 245–250.
3. Оморов Т.Т., Джолдошев Б.О., Полянинов Г.А. Построение подсистемы стабилизации синхронным генератором // Проблемы автоматики и управления.– Б.: Илим, 2004. – С.106-114.
4. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980.
5. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования // Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967, 1968. –Кн. 1,2,3.
6. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Теория и системы управления. М.:Наука. 2008. №1. С. 112-119.
7. Борцов Ю.В., Юрганов А.А., Поляков Н.Д. Исследование нечетких стабилизаторов возбуждения синхронного генератора // Электричество. №8. 1999. С. 50-55.
8. Оморов Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез систем управления многомерными объектами по критериальным ограничениям // Известия НАН КР, №1. – Б.: Илим, 2009
9. Оморов Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез адаптивного регулятора многомерной системы управления в условиях параметрической неопределенности // Известия НАН КР. -№2. – Б.: Илим, 2010.

