

УДК 681.5.013

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В. Ф. Шишляков,

доктор техн. наук, профессор

Д. В. Шишляков,

аспирант

С. А. Цветков,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

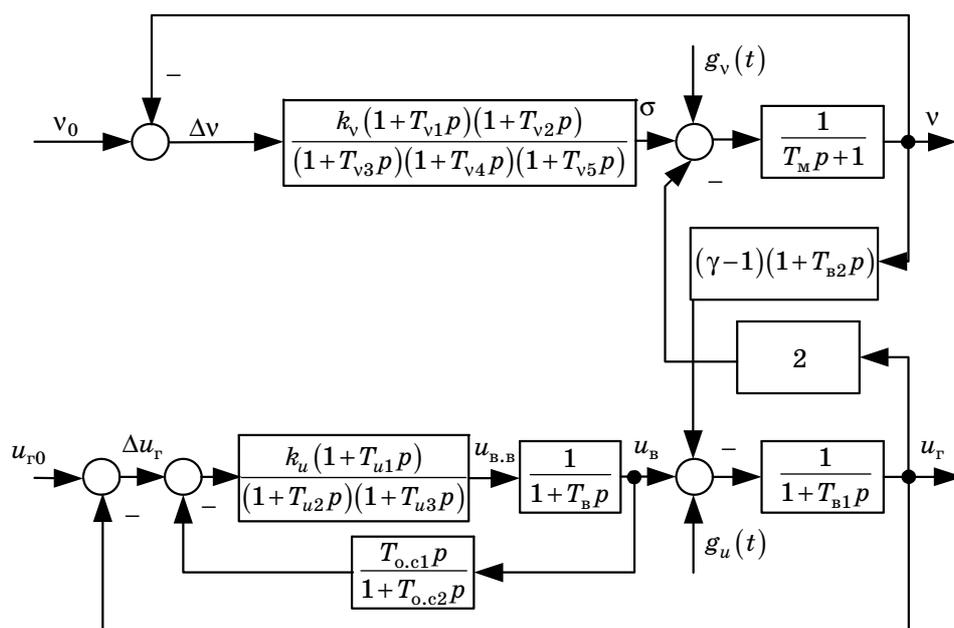
Рассматривается решение задачи синтеза параметров регуляторов в каналах регулирования частоты и напряжения автономной электроэнергетической установки обобщенным методом Галеркина. Приводятся результаты моделирования работы данной установки с синтезированными параметрами регуляторов в нормальном режиме.

Рассмотрим решение задачи синтеза параметров регуляторов электроэнергетической установки (ЭЭУ), предназначенной для электроснабжения переменным током стабильной частоты. Поставленная задача решается обобщенным методом Галеркина [1, 2], возможность применения которого к непрерывным многосвязным системам автоматического управления (МСАУ) была показана в работах [3–5].

Из структурной схемы математической модели ЭЭУ (рис. 1) видно, что данная САУ представляет собой двусвяз-

ную систему автоматического регулирования частоты и напряжения синхронного генератора, приводимого регулируемым двигателем соизмеримой мощности без корректора частоты.

Динамические звенья МСАУ описываются следующими уравнениями:
— приводной двигатель:



■ Рис. 1. Структурная схема математической модели ЭЭУ

$$(R + T_M p)v(t) = \sigma(t) + g_v(t) - 2u_r(t),$$

где $R = 1$ — коэффициент самовыравнивания агрегата; $T_M = 1$ с — постоянная времени приводного двигателя; $v(t)$ — скорость вращения приводного двигателя (частота напряжения на выходе ЭЭУ); $\sigma(t)$ — сигнал на выходе регулятора скорости; $g_v(t)$ — внешнее возмущающее воздействие в канале изменения частоты, действующее на приводной двигатель; $u_r(t)$ — напряжение на выходе ЭЭУ;

— регулятор скорости вращения приводного двигателя:

$$(1 + T_{v3}p)(1 + T_{v4}p)(1 + T_{v5}p)\sigma(t) = k_v(1 + T_{v1}p)(1 + T_{v2}p)\Delta v(t),$$

где $T_{v1}, \dots, T_{v5}, k_v$ — постоянные времени и коэффициент передачи регулятора скорости вращения приводного двигателя; $\Delta v(t) = v_0(t) - v(t)$ — относительное изменение скорости вращения приводного двигателя, здесь $v_0(t)$ — заданное значение скорости (частоты напряжения на выходе установки);

— синхронный генератор:

$$(1 + T_{B1}p)u_r(t) = u_B(t) + (1 - \gamma) \times (1 + T_{B2}p)v(t) + g_u(t),$$

где $T_{B1} = 0,5$ с; $T_{B2} = 0,01$ с — постоянные времени синхронного генератора, обусловленные индуктивностью цепи возбуждения и реакцией якоря; $(1 - \gamma) = 0,8$ — коэффициент, характеризующий режим работы синхронного генератора; $u_B(t)$ — напряжение на зажимах возбuditеля; $g_u(t)$ — внешнее возмущающее воздействие в канале регулирования напряжения, действующее на синхронный генератор;

— возбудитель:

$$(1 + T_B p)u_B(t) = u_{B.B}(t),$$

где $T_B = 0,01$ с — постоянная времени возбудителя; $u_{B.B}(t)$ — напряжение на обмотке возбуждения возбудителя.

Передачная функция регулятора напряжения

$$W_{p.n}(p) = \frac{k_u(1 + T_{u1}p)}{(1 + T_{u2}p)(1 + T_{u3}p)},$$

где $T_{u1}, T_{u2}, T_{u3}, k_u$ — постоянные времени и коэффициент передачи регулятора напряжения ЭЭУ.

Канал регулирования напряжения ЭЭУ дополнен гибкой отрицательной обратной связью (ГОС) по напряжению, имеющей передаточную функцию

$$W_{o.c}(p) = \frac{T_{o.c1}p}{(1 + T_{o.c2}p)},$$

где $T_{o.c1}, T_{o.c2}$ — постоянные времени звена коррекции в цепи гибкой обратной связи.

На основе уравнений, описывающих динамику отдельных звеньев, входящих в состав исследуемой ЭЭУ, получена следующая система дифференциальных уравнений, определяющая динамические процессы в системе регулирования, как много-связной линейной САУ:

$$\left[\begin{aligned} & [(k_v + 1) + [k_v(T_{v1} + T_{v2}) + T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_M]p + \\ & + [k_v T_{v1} T_{v2} + T_{v3} T_{v4} + T_{v5} T_M + (T_{v3} + T_{v4})(T_{v5} + T_M)]p^2 + \\ & + [T_{v3} T_{v4} (T_{v5} + T_M) + T_{v5} T_M (T_{v3} + T_{v4})]p^3 + \\ & + T_{v3} T_{v4} T_{v5} T_M p^4]v(t) + 2[1 + (T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_M)p + \\ & + [T_{v3} T_{v4} + T_{v5} T_M + (T_{v3} + T_{v4})(T_{v5} + T_M)]p^2 + \\ & + [T_{v3} T_{v4} (T_{v5} + T_M) + T_{v5} T_M (T_{v3} + T_{v4})]p^3 + \\ & + T_{v3} T_{v4} T_{v5} T_M p^4]u_r(t) = k_v [1 + (T_{v1} + T_{v2})p + T_{v1} T_{v2} p^2] \times \\ & \times v_0(t) + [(1 - \gamma) + (1 - \gamma)(T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1} + T_{B2}) \times \\ & \times p + (1 - \gamma)[(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + k_u T_{o.c1} T_{u1} + (T_{o.c2} + T_{u2}) \times \\ & \times (T_{u3} + T_B)) + T_{B2} (T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1})]p^2 + \\ & + (1 - \gamma)[(T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}) + T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B) + \\ & + T_{B2} (T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + (T_{o.c2} + T_{u2})(T_{u3} + T_B) + k_u T_{o.c1} T_B)]p^3 + \\ & + (1 - \gamma)[T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T + T_{B2} (T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}))] \times \\ & \times p^4 + (1 - \gamma) T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B T_{B2} p^5]v(t) + [(k_u + 1) + \\ & + (T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u (T_{o.c1} + T_{o.c2} + T_{u1} + T_B) + T_{B1})p + \\ & + [(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + k_u T_{o.c1} T_{u1} + (T_{o.c2} + T_{u2})(T_{u3} + T_B)) + \\ & + T_{B1} (T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1}) + \\ & + k_u (T_{o.c2} T_{u1} + T_{o.c2} T_B + T_{u1} T_B)]p^2 + \\ & + [(T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}) + T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B) + \\ & + T_{B1} (T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + (T_{o.c2} + T_{u2})(T_{u3} + T_B) + \\ & + k_u T_B (T_{o.c1} + T_{o.c2} T_{u1}))]p^3 + [T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B + T_{B1} \times \\ & \times (T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}))]p^4 + \\ & + T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B T_{B1} p^5]u_r(t) = k_u [1 + (T_{o.c2} + T_{u1} + T_B)p + \\ & + (T_{o.c2} T_{u1} + T_{o.c2} T_B + T_{u1} T_B)p^2 + T_{o.c2} T_{u1} T_B p^3]u_{r0}(t). \end{aligned} \right.$$

Для решения задачи синтеза параметров звеньев коррекции обобщенным методом Галеркина представим полученную систему уравнений в общем виде [3–5]:

$$\begin{cases} Q_{11}(c_k, D)v(t) + Q_{12}(c_k, D)u_T(t) = \\ = S_{11}(c_k, D)v_0(t) \\ Q_{21}(c_k, D)v(t) + Q_{22}(c_k, D)u_T(t) = \\ = S_{22}(c_k, D)u_{r0}(t) \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} Q_{11}(c_k, D) &= \sum_{i=0}^4 a_{11i}(c_k)D^i; \quad Q_{12}(c_k, D) = \sum_{i=0}^4 a_{12i}(c_k)D^i; \\ S_{11}(c_k, D) &= \sum_{i=0}^2 e_{11i}(c_k)D^i; \quad Q_{21}(c_k, D) = \sum_{i=0}^5 a_{21i}(c_k)D^i; \\ Q_{22}(c_k, D) &= \sum_{i=0}^5 a_{22i}(c_k)D^i; \quad S_{22}(c_k, D) = \sum_{i=0}^3 e_{22i}(c_k)D^i; \end{aligned}$$

здесь

$$\begin{aligned} a_{110} &= k_v + 1; \\ a_{111} &= k_v(T_{v1} + T_{v2}) + T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_M; \\ a_{112} &= k_v T_{v1} T_{v2} + T_{v3} T_{v4} + T_{v5} T_M + (T_{v3} + T_{v4}) \times \\ &\times (T_{v5} + T_M); \\ a_{113} &= T_{v3} T_{v4} (T_{v5} + T_M) + T_{v5} T_M (T_{v3} + T_{v4}); \\ a_{114} &= T_{v3} T_{v4} T_{v5} T_M; \\ a_{120} &= 2; \\ a_{121} &= 2(T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_M); \\ a_{122} &= 2[T_{v3} T_{v4} + T_{v5} T_M + (T_{v3} + T_{v4})(T_{v5} + T_M)]; \\ a_{123} &= 2[T_{v3} T_{v4} (T_{v5} + T_M) + T_{v5} T_M (T_{v3} + T_{v4})]; \\ a_{124} &= 2T_{v3} T_{v4} T_{v5} T_M; \\ e_{110} &= k_v; \\ e_{111} &= k_v(T_{v1} + T_{v2}); \\ e_{112} &= k_v T_{v1} T_{v2}; \\ a_{210} &= (1 - \gamma); \\ a_{211} &= (1 - \gamma)(T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1} + T_{B2}); \\ a_{212} &= (1 - \gamma)[(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + k_u T_{o.c1} T_{u1} + \\ &+ (T_{o.c2} + T_{u2})(T_{u3} + T_B)) + \\ &+ T_{B2}(T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1})]; \\ a_{213} &= (1 - \gamma)[(T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}) + \\ &+ T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B) + T_{B2}(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + (T_{o.c2} + T_{u2}) \times \\ &\times (T_{u3} + T_B) + k_u T_{o.c1} T_B)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{214} &= (1 - \gamma)T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T + T_{B2}(T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + \\ &+ T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2})); \\ a_{215} &= (1 - \gamma)T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B T_{B2}; \\ a_{220} &= k_u + 1; \\ a_{221} &= T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + T_{B1} + k_u \times \\ &\times (T_{o.c1} + T_{o.c2} + T_{u1} + T_B); \\ a_{222} &= [(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + k_u T_{o.c1} T_{u1} + (T_{o.c2} + T_{u2}) \times \\ &\times (T_{u3} + T_B)) + T_{B1}(T_{o.c2} + T_{u2} + T_{u3} + T_B + k_u T_{o.c1}) + \\ &+ k_u (T_{o.c2} T_{u1} + T_{o.c2} T_B + T_{u1} T_B)]; \\ a_{223} &= [(T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}) + \\ &+ T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B) + T_{B1}(T_{o.c2} T_{u2} + T_{u3} T_B + \\ &+ (T_{o.c2} + T_{u2})(T_{u3} + T_B) + k_u T_B (T_{o.c1} + T_{o.c2} T_{u1}))]; \\ a_{224} &= [T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B + T_{B1} \times \\ &\times (T_{o.c2} T_{u2} (T_{u3} + T_B) + T_{u3} T_B (T_{o.c2} + T_{u2}))]; \\ a_{225} &= T_{o.c2} T_{u2} T_{u3} T_B T_{B1}; \\ e_{220} &= k_u; \\ e_{221} &= k_u (T_{o.c2} + T_{u1} + T_B); \\ e_{222} &= k_u (T_{o.c2} T_{u1} + T_{o.c2} T_B + T_{u1} T_B); \\ e_{223} &= k_u T_{o.c2} T_{u1} T_B. \end{aligned}$$

Таким образом, для решения поставленной задачи требуется определить значения 12 варьируемых параметров ($T_{v1}, T_{v2}, T_{v3}, T_{v4}, T_{v5}, k_v, T_{u1}, T_{u2}, T_{u3}, k_u, T_{o.c1}, T_{o.c2}$), обеспечивающих в синтезируемой МСАУ следующие показатели качества переходных процессов по напряжению и частоте: время переходного процесса как по напряжению, так и по частоте не должно превышать 0,5 с; переходной процесс по напряжению должен иметь экспоненциальный характер, а величина перерегулирования в процессе изменения частоты (скорости вращения приводного двигателя) не должна превышать 10 %.

Исходя из требуемых показателей качества переходных процессов на основании подхода, изложенного в работах [1, 2], определим параметры желаемых программных движений:

— коэффициент затухания процессов

$$\alpha = \frac{3 \div 4}{T_{п.п}} = 6 \div 8,$$

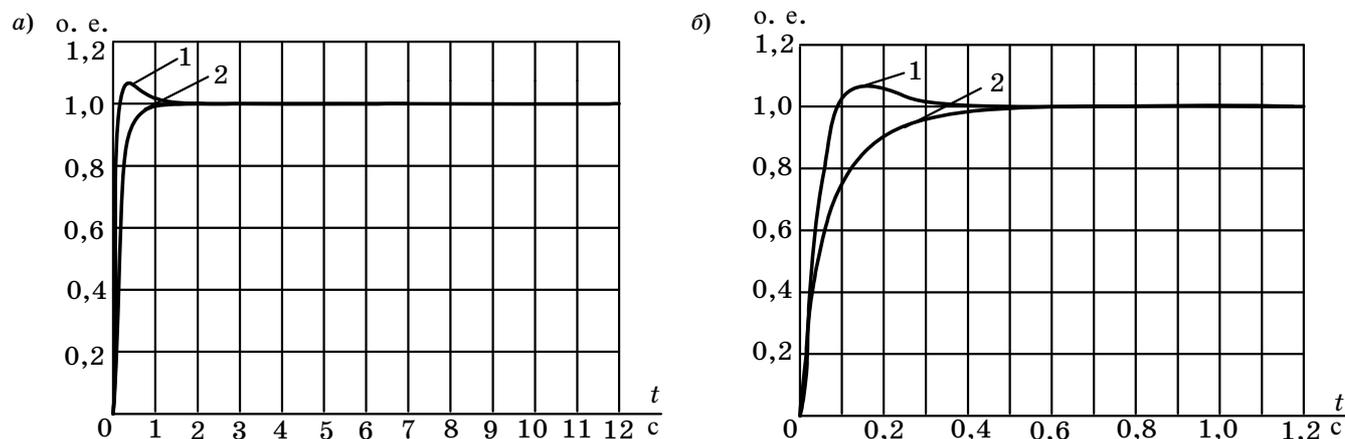
где $T_{п.п}$ — время переходного процесса;

— собственная частота колебаний скорости приводного двигателя, начальный фазовый сдвиг и амплитуда процесса:

$$\beta = \alpha \omega = (6 \div 8) \cdot 1,6 = 9,6 \div 12,8 \text{ рад/с};$$

■ Значения параметров регуляторов ЭЭУ

Регулятор частоты					Регулятор напряжения			ГОС			
k_v	T_{v1}, c	T_{v2}, c	T_{v3}, c	T_{v4}, c	T_{v5}, c	k_u	T_{u1}	T_{u2}	T_{u3}	$T_{o.c1}$	$T_{o.c2}$
340	2,53	0,15	1,751	0,0054	3,0	170	0,01	0,001	0,005	0,037	0,31



■ Рис. 2. Процессы изменения напряжения и частоты в ЭЭУ в нормальном режиме работы при времени интегрирования: а — 10 с; б — 1 с: 1 — процесс изменения частоты; 2 — процесс изменения напряжения

$$\varphi_0 = \arctg\left(\frac{1}{\mu}\right) = \arctg\left(\frac{1}{1,6}\right) = 0,558 \text{ рад};$$

$$H^* = \sqrt{1 + \frac{1}{\mu^2}} = \sqrt{1 + \frac{1}{1,6^2}} = 1,179 \text{ рад/с},$$

где $\mu = 1,6$ — колебательность процесса, соответствующая перерегулированию 10 %.

В результате желаемые программные движения в МСАУ ЭЭУ будут иметь вид

$$\begin{aligned} v^0(t) &= [v_y - H^* \cos(\beta t - \varphi_0) e^{-\alpha t}] 1(t) = \\ &= [1 - 1,179 \cos(9,8t - 0,558) e^{-7t}] 1(t), \end{aligned}$$

где v_y — установившееся значение частоты напряжения на выходе ЭЭУ;

$$u_r^0(t) = u_{r,y} (1 - e^{-\alpha t}) 1(t) = (1 - e^{-7t}) 1(t),$$

где $u_{r,y}$ — установившееся значение амплитуды напряжения на выходе ЭЭУ.

При решении задачи параметрического синтеза ЭЭУ обобщенным методом Галеркина [1–5] были получены значения искомых параметров (таблица).

Моделирование процессов в математической модели ЭЭУ проводилось в программном комплексе MATLAB Simulink. Результаты моделирования динамических процессов изменения напряжения

и частоты в МСАУ ЭЭУ при двух одновременно действующих на входах единичных скачкообразных ступенчатых воздействиях показаны на рис. 2.

Как видно из графиков, процессы в ЭЭУ с синтезированными параметрами имеют показатели качества, соответствующие заданным (отклонение по напряжению не превышает 5 %, а по частоте — 2 %, что соответствует ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1)).

Литература

1. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлякова; СПбГУАП. СПб., 2003. 358 с.
2. Шишляков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: Монография / СПбГУАП. СПб., 1999. 268 с.
3. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // Изв. вузов. Сер. Проблемы энергетики. 2006. № 12. С. 49–54.
4. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез САУ с амплитудно-импульсными модуляторами // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2007. № 8. С. 13–17.
5. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2007. № 12. С. 13–17.