

УДК 620.91/98

А.В. Макаренко, Ю.М. Осипов, А.В. Прилипов, А.Е. Сорокин

Проектирование автономных систем следящих приводов с высокой энергетической эффективностью

Приведена методика проектирования автономных систем следящих приводов с высокой энергетической эффективностью с учетом поиска комплексного решения на различных этапах проектирования с привязкой к конкретному объекту на примере математической модели автономного следящего привода с исполнительным механизмом типа роторно-волнового двигателя.

Ключевые слова: системный подход, энергетическая эффективность, автономный роторно-волновой привод.

В технологических средах существуют много физических и информационных факторов, вредно влияющих на работоспособность и эффективность систем приводов: вибрации и удары, наклоны подвижных звеньев технологического оборудования, широкий диапазон нагрузочных характеристик, изменяющихся случайным образом; многофункциональность рабочих органов, низкая информационная насыщенность процессов управления и т.п.

Физические и информационные вредные воздействия накладывают определенные требования к конструкции и компоновке оборудования, осуществляемым технологическим операциям в реальном масштабе времени. Для эффективности функционирования систем следящих приводов необходимо для каждого случая синтезировать свою специализированную систему, обеспечивающую высокую работоспособность и энергетическую эффективность.

Важным критерием оценки энергоэффективности систем приводов являются работоспособность, массогабаритные показатели приводной части вместе с источником питания. Энергетические свойства источника питания оцениваются потребляемой мощностью в течение заданного времени и возможностью отработки пиковой мощности.

Проектирование систем приводов высокой энергетической эффективности требует:

- 1) поиска комплексного решения на различных этапах проектирования;
- 2) привязки решения задачи проектирования к конкретному объекту [1].

В качестве примера комплексного проектирования энергоэффективного следящего привода рассмотрим процесс создания автономного следящего привода с исполнительным механизмом типа роторно-волнового двигателя (РВД) (рис. 1). Автономный роторно-волновой привод выполнен по следующей схеме: информационная электрическая часть (система управления) с широтно-импульсным модулятором, силовая часть с исполнительным механизмом типа роторно-волнового двигателя и шариковым волновым редуктором [2, 3].

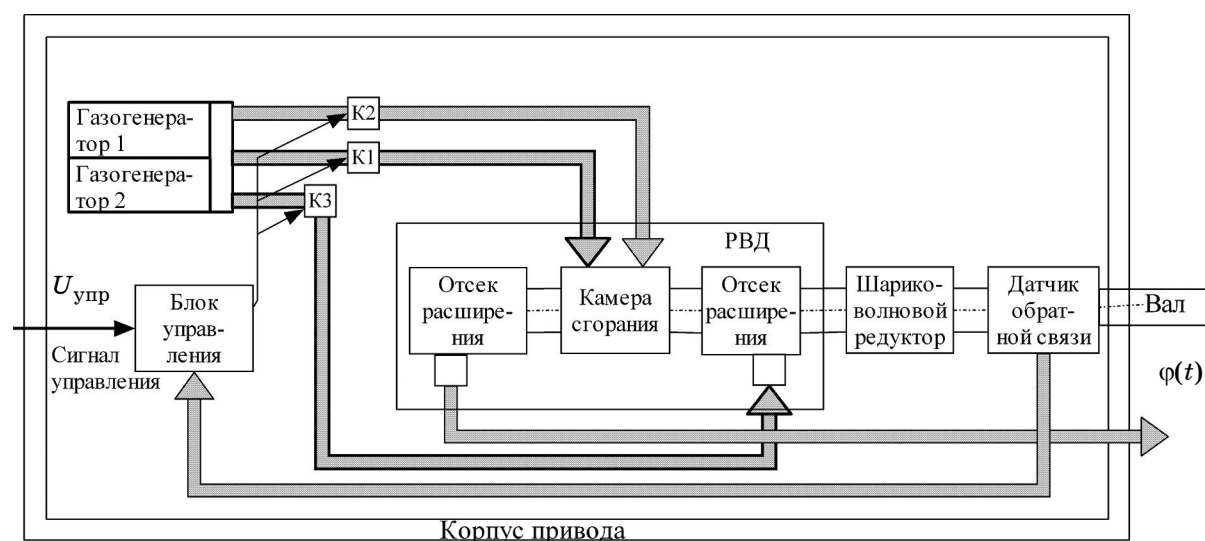


Рис. 1. Функциональная схема автономного роторно-волнового привода:

Привод имеет обратную связь по положению (углу), реализованную датчиком обратной связи индукционного типа. Характерной особенностью привода является то, что в качестве рабочего тела он использует воздух из окружающей среды (для парашютной системы) или имеет в своем составе пороховой газогенератор (для беспилотных летательных аппаратов).

В автономном следящем приводе реализовано пропорциональное управление исполнительным механизмом за счет включения в информационную часть широтно-импульсного модулятора (преобразующего сигнал рассогласования в импульсы изменяемой длительности), управляющего набором электропневматических клапанов. Для обеспечения устойчивости следящего привода необходимы корректирующие связи.

Рассмотрим математическую модель автономного следящего привода с исполнительным механизмом типа роторно-волнового двигателя поэлементно.

Электропневмоклапан. В зависимости от величины рассогласования U_{Θ} определяет величину площади проходного сечения электропневмоклапана $A_{кл}$ по уравнению следующего вида:

$$A_{кл} = \begin{cases} A_{кл}, & \text{при } U_{\Theta} \geq U_{ср}, \\ 0, & \text{при } U_{\Theta} \leq U_{отп}, \\ A_{кл}(t) = A_{кл}(t + \tau), & \end{cases}$$

где $U_{ср}$ – напряжение срабатывания электропневмоклапана; $U_{отп}$ – напряжение отпущения электропневмоклапана.

При управлении клапаном с помощью широтно-импульсного модулятора нелинейный элемент электропневмоклапан можно описать следующим уравнением:

$$\frac{G(s)}{U_{\gamma}} = \frac{k_{oy}k_m \frac{1}{k_{\alpha}} k_G}{(T_{oy}s + 1)(T_M^2 s^2 + 2\xi T_M s + 1)},$$

где $k_{oy} = \frac{1}{R_{oy} + R_{ym}}$ – коэффициент усиления обмоток управления клапана и усилителя мощности; R_{oy} , R_{ym} – омические сопротивления обмоток управления клапана и усилителя мощности; $T_{oy} = \frac{L_{oy}}{R_{oy} + R_{ym}}$ – электромагнитная постоянная времени; L_{oy} – индуктивность

обмоток управления; $T_M = \sqrt{\frac{m}{c}}$ – механическая постоянная времени; m – масса подвижных элементов электропневмоклапана; c – жесткость пружины электропневмоклапана; $\xi = \frac{k_m}{2\sqrt{mc}}$ – коэффициент демпфирования; $k_G = p_z \mu \Phi(k) \Phi(RT_z)$ – коэффициент усиления по

расходу; μ – коэффициент расхода, p_z – давление питания; $\Phi(RT_z) = \sqrt{\frac{1}{RT_z}}$;

$\Phi(k) = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$; T_z – температура газа на входе в привод; R – универсальная газовая

постоянная; k – постоянная адиабаты; $k_m = i_y / M_{\text{экл}}$ – коэффициент усиления по току электропневмоклапана; $k_{\alpha} = M_{\text{экл}} / A_{кл}$ – коэффициент усиления по моменту электропневмоклапана; $A_{кл}$ – проходное сечение клапана; i_y – ток обмотки управления клапана; $M_{\text{экл}}$ – момент на электроклапане; s – оператор Лапласа.

Роторно-волновой двигатель.

$$M_{дв} = F \cdot R_{ср},$$

$$F = S(p_{вх} - p_{вых}) = S \cdot \Delta p,$$

где F – сила, развиваемая ротором двигателя при его вращении; Δp – перепад давления газа, создающий крутящий момент; S – суммарная эффективная площадь витков, на которые действует газ; $R_{ср}$ – средний радиус ротора роторно-волнового двигателя.

Передаточная функция двигателя:

$$W_{\text{дв}} = \frac{\varphi_{\text{дв}}(s)}{p_{\text{вх}}(s)} = K_{\text{дв}}.$$

С учетом утечек в РВД и времени заполнения газом отсека камеры сгорания:

$$G_{\text{ут}}^* = k_{\text{ут}} p_z,$$

где $k_{\text{ут}} = \mu_{\text{ут}} A_{\text{ут}} \Phi(k) \Phi(RT_z)$; $\mu_{\text{ут}}$ – коэффициент расхода утечек; $A_{\text{ут}}$ – площадь сечения.

$$\frac{P_{\text{вх}}}{G_{\text{ут}}^*} = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{н}} s + 1},$$

где $K_{\text{д}} = 1/k_p$; $T_{\text{н}} = \frac{V_{\text{с.г}}}{RT_z k_p}$ – постоянная времени наполнения камеры сгорания и отсека расширения; $V_{\text{с.г}}$ – объем камеры сгорания и отсека расширения; $k_p = \mu A_{\text{кл}} \Phi(k) \Phi(RT_z)$ – коэффициент усиления по давлению.

Редуктор.

$$M_{\text{дв}}^* = M_{\text{дв}} \cdot q,$$

$$\Omega_{\text{дв}}^* = \frac{\Omega_{\text{дв}}}{q},$$

где $M_{\text{дв}}^*$ – момент на выходном валу привода; $M_{\text{дв}}$ – момент на выходном валу двигателя; $\Omega_{\text{дв}}^*$ – скорость выходного вала привода; $\Omega_{\text{дв}}$ – скорость выходного вала двигателя; q – передаточное число редуктора.

Усилитель мощности. Вырабатывает сигнал рассогласования U_{\ominus} между заданным (управляющим) напряжением $U_{\text{упр}}$ и напряжением на зажимах датчика обратной связи $U_{\text{ос}}$:

$$U_{\ominus} = U_{\text{сигн}} - U_{\text{ос}}.$$

В передаточной функции клапана была учтена инерционность нарастания тока в обмотках управления усилителя мощности.

Уравнения силовой части:

$$\left(M_{\text{дв}} - \frac{M_{\text{ад}}}{q}\right) \cdot \frac{1}{J_{\text{дв}} \cdot s^2} = \varphi_{\text{дв}},$$

$$\left(\frac{\varphi_{\text{дв}}}{q} - \varphi_{\text{с}}\right) \cdot C_1 = M_{\text{ад}},$$

$$(M_{\text{ад}} - M_{\text{н}}) \cdot \frac{1}{J_{\text{н}} \cdot s^2} = \varphi_{\text{с}}.$$

Таким образом, вышеприведенную систему уравнений можно записать в виде дифференциальных уравнений:

$$\left(M_{\text{дв}} - \frac{M_{\text{ад}}}{q}\right) \cdot \frac{1}{J_{\text{дв}}} = \frac{d^2 \varphi_{\text{дв}}}{dt^2},$$

$$\left(\frac{\varphi_{\text{дв}}}{q} - \varphi_{\text{с}}\right) \cdot C_1 = M_{\text{ад}},$$

$$(M_{\text{ад}} - M_{\text{н}}) \cdot \frac{1}{J_{\text{н}}} = \frac{d^2 \varphi_{\text{с}}}{dt^2},$$

где $\frac{d^2 \varphi_{\text{дв}}}{dt^2}$ – вторая производная по углу поворота выходного вала двигателя или ускоре-

ние выходного вала двигателя; $\frac{d^2 \varphi_{\text{с}}}{dt^2}$ – вторая производная по углу поворота выходного

вала привода или ускорение выходного вала привода; $M_{\text{ад}}$ – момент двигателя с учетом жесткости выходного вала; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки; $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя; $J_{\text{н}}$ – момент инерции нагрузки; C_1 – жесткость вала РВД; q – передаточное число редуктора.

На основании представленного описания предлагаем методику комплексного подхода к проектированию автономного роторно-волнового привода для конкретного объекта:

1) рассчитываются основные параметры исполнительного механизма (согласно данным технического задания) – РВД (объемы камер отсеков сжатия и расширения рабочего тела, параметры камеры сгорания и т.п.) и волновой передачи; проектируется система управления приводом (электронные схемы);

2) по исходным данным системы управления роторно-волновым двигателем (максимальному напряжению питания) выбирается источник энергопитания, чтобы обеспечить питание информационной части автономного привода;

3) оценивается масса источника питания. По известным разрядным характеристикам (они прилагаются к каждому конкретному образцу) определяются параметры модели источника и составляется математическая модель автономного следящего привода вместе с выбранным бортовым источником питания;

4) производится оценка статических, динамических, энергетических и технических параметров автономного роторно-волнового привода. Это базовая оценка структуры модели привода с конкретным источником и силовой частью;

5) разрабатывается модель системы «источник – система управления – роторно-волновой двигатель», которая позволяет найти выходные технические характеристики исполнительного механизма в целом;

6) в случае необходимости проводится корректировка разработанной математической модели.

Литература

1. Осипов Ю.М. Операционные автоматы с электроприводом прямого действия. – Томск: ИПФ ТПУ, 1997. – 185 с.

2. Геращенко А.Н. Проектирование энергоэффективных систем приводов управления автономными объектами: учеб. пособие / А.Н. Геращенко, В.И. Толмачев, В.И. Лалабеков. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 272 с.

3. Пат. 2 314 427 РФ, МПК F 02 В 53/14. Автономный привод / А.Н. Геращенко, Л.И. Лалабеков, А.В. Макаренко, А.В. Прилипов, С.Л. Самсонович (РФ). – № 2 006 110 365/06; заявл. 31.03.06; опубл. 10.01.08. Бюл. – № 1. – 9 с.

Макаренко Александр Валерьевич

Аспирант Московского авиационного института (МАИ), мл. науч. сотр. НИЛ «Поиск» НИЧ МАИ
Тел.: (499) 158-41-40

Осипов Юрий Мирзоевич

Д-р техн. наук, д-р экон. наук, проф., зав. отделением каф. ЮНЕСКО ТУСУРа
Тел. 41-38-64
Эл почта: umo@main.tusur.ru

Прилипов Алексей Валерьевич

Аспирант МАИ, мл. науч. сотр. НИЛ «Поиск» НИЧ МАИ
Тел.: (499) 158-41-40

Сорокин Андрей Евгениевич

Помощник ректора МАИ
Тел.: (499) 158-41-40

A.V. Makarenko, Yu.M. Osipov, A.V. Prilipov, A.E. Sorokin

Designing independent systems of servo drives with high power efficiency

A technique of designing independent systems of servo drives with high power efficiency is presented. The technique includes search of end-to-end solution at the different designing stages, which is binded to specific object. The example of mathematical model of independent servo drive with an actuator like wave rotor engine is considered.

Key words: the system approach, power efficiency, an independent rotor-wave drive.