

УДК 681.513.6

А.С. ГОЛЬЦОВ¹, А.В. КЛИМЕНКО², О.Л. ЛЫТИКОВ²¹ Волжский политехнический институт, Россия² ОАО Волжская ГЭС, Россия

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПУСКА ГИДРОТУРБИНЫ ГЭС

Разработаны нелинейная модель объекта управления в пространстве состояний и структурная схема системы автоматического управления с обучаемой моделью. Получены алгоритмы обучения модели объекта управления, задания требуемых углов установки лопаток направляющего аппарата и рабочего колеса и формирования управляющих воздействий.

адаптивное управление, обучаемая нелинейная модель гидротурбины, ограниченные по абсолютной величине возмущающие воздействия

Введение

Для обеспечения надежности энергосистемы гидроагрегаты ГЭС, находящиеся в резерве, должны быть в состоянии готовности к немедленному автоматическому пуску. При этом набор нагрузки каждого гидроагрегата должен происходить с максимальной скоростью при минимальном времени открытия направляющего аппарата (НА) турбины [1].

Существующие системы управления максимального быстродействия, оснащенные ПИД-регуляторами с постоянными параметрами, имеют, как правило, статическую погрешность и создают существенное перерегулирование переменных состояния многомерных объектов управления (ОУ). Это связано с тем, что синтез алгоритмов управления для этих систем выполнен на базе линейных моделей ОУ и без учета реальных законов изменения возмущающих воздействий [2].

Эффективность управления гидроагрегатами ГЭС при пуске можно улучшить с помощью методов адаптивного управления, использующих обучаемые нелинейные модели процессов, происходящих в ОУ [3].

Постановка задачи. Переходные процессы в гидротурбине (ГТ), оснащенной устройством авто-

матического поворота лопаток рабочего колеса (РК) и НА (комбинатором), описывают уравнениями:

$$J \cdot \frac{dn(t)}{dt} = Md(n(t), z(t), \gamma(t)) - Mc(n(t)); \quad (1)$$

$$\tau_1 \cdot \frac{dz(t)}{dt} = -z(t) + w(t) + b_1 \cdot u_1(t); \quad (2)$$

$$\tau_2 \cdot \frac{d\gamma(t)}{dt} = -\gamma(t) + \varphi(z(t)) + b_2 \cdot u_2(t); \quad (3)$$

$$y(t) = [n(t) \quad z(t) \quad \gamma(t)]^T + \varepsilon(t), \quad (4)$$

где: J – осевой момент инерции ротора;

$n(t)$ – частота вращения ротора;

$Md(n(t), z(t), \gamma(t))$ – момент движущих сил;

$Mc(n(t))$ – момент сил сопротивления;

$z(t)$ – угол установки лопаток направляющего аппарата;

$\gamma(t)$ – угол установки лопаток РК;

$w(t)$ – возмущающее воздействие на лопатки направляющего аппарата;

$\varphi(z)$ – статическая характеристика комбинатора;

τ_1, τ_2 – постоянные времени механизмов поворота лопаток НА и РК;

$u_1(t), u_2(t)$ – управляющие воздействия;

$y(t)$ – вектор выходных сигналов датчиков;

$\varepsilon(t)$ – вектор погрешностей измерений.

Задача управления заключается в переводе ГТ за минимальное время регулирования t_p из начального состояния в режим холостого хода. При этом должны выполняться следующие ограничения на переменные состояния ОУ:

$$n_{mp}(t) - \Delta n_{don} \leq n(t) \leq n_{mp}(t) + \Delta n_{don}; \quad (5)$$

$$\gamma_{mp}(n(t)) - \Delta \gamma_{don} \leq \gamma(t) \leq \gamma_{mp}(n(t)) + \Delta \gamma_{don}; \quad (6)$$

$$z_{\min} - \Delta z_{don} \leq z(t) \leq z_{\max} + \Delta z_{don}. \quad (7)$$

Функциональные зависимости момента движущих сил, момента сил сопротивления и статической характеристики комбинатора от переменных состояния ОУ заданы приближенно, а возмущающие воздействия не известны. Но синтез адаптивной системы управления многомерным нелинейным объектом возможен только в том случае, когда известны оптимальные (требуемые) траектории перехода всех переменных состояния ОУ в заданное конечное состояние и математическая модель формирования всех влияющих факторов, недоступных измерениям [4]. Поэтому в разрабатываемую систему управления ГТ включены модуль обучения модели ОУ (1)-(7) и формирователь задания регулятору, вычисляющий требуемые значения $z_{mp}(t)$ углов установки лопаток НА с помощью обученной модели ОУ.

Таким образом, синтез адаптивной системы автоматического управления процессом пуска ГТ включает разработку алгоритмов обучения модели ОУ, определения требуемых углов установки лопаток НА и формирования управляющих воздействий.

Обучаемая модель объекта управления

Система управления разрабатывалась для турбины № 19 Волжской ГЭС.

При синтезе модели ОУ зависимости момента движущих сил, момента сил сопротивления и статической характеристики комбинатора от переменных

состояния описывали степенными рядами и (или) В-сплайнами:

$$Md(n(t), z(t), \gamma(t)) = \sum_j c_j \cdot f_j(n(t), z(t), \gamma(t)); \quad (8)$$

$$Mc(t) = \sum_i \beta_i \cdot \psi_i(n(t)); \quad (9)$$

$$\varphi(z(t)) = \sum_p q_p \cdot \eta_p(z(t)), \quad (10)$$

которые содержат неизвестные параметры c_j , β_i , q_p и известные функции переменных состояния.

Начальные оценки параметров модели ГТ (8)–(10) были определены методом наименьших квадратов (МНК) с использованием результатов измерений переменных состояния ОУ при пусках и остановках анализируемой турбины.

Результаты идентификации модели ОУ (8)–(10) представлены на графиках (рис. 1 и рис. 2).

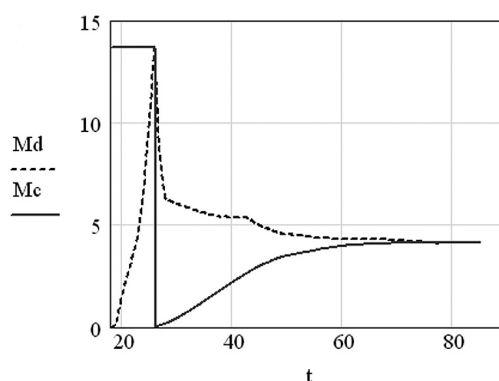


Рис. 1. Графики моментов движущих сил и сил сопротивления

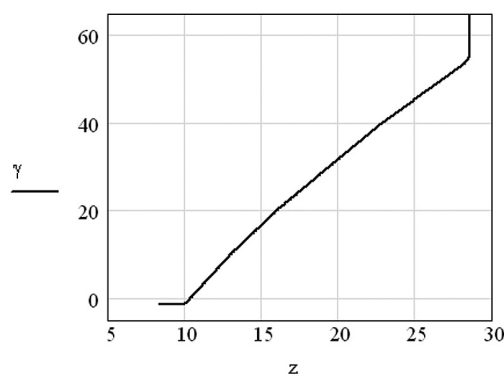


Рис. 2. Статическая характеристика комбинатора

В процессе управления параметры модели уточняют с помощью алгоритма рекуррентного МНК,

в котором используют результаты измерений переменных состояния и значения управляющих воздействий, сформированные в предыдущие моменты времени.

Модель ОУ (1) – (10) используется в цифровом регуляторе разрабатываемой системы управления для определения требуемого закона поворота лопаток НА и формирования управляющих воздействий.

Формирование задания регулятору

При синтезе алгоритма управления предполагалось, что требуемые законы изменения частоты вращения $n_{mp}(t)$ и угла установки лопаток РК $\gamma_{mp}(t)$ известны. В частности, использовались значения переменных $n_{mp}(t)$ и $\gamma_{mp}(t)$, графики изменения которых приведены на рис. 3 и 4 сплошными линиями.

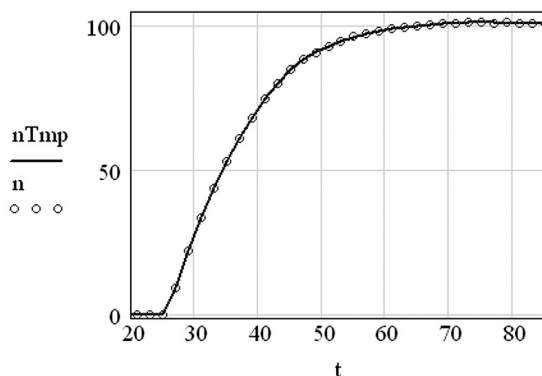


Рис. 3. Результаты регулирования частоты вращения ротора

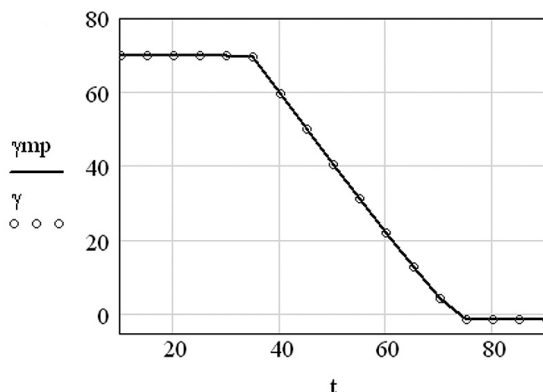


Рис. 4. Результаты регулирования угла установки лопаток РК

Этим переменным соответствует момент движущих сил $Md_{mp}(t)$:

$$Md_{mp}(t) = J \cdot \frac{dn_{mp}(t)}{dt} + \sum_i \beta_i \cdot \psi_i(n_{mp}(t)).$$

Требуемый закон изменения угла установки лопаток НА можно формировать с помощью динамической системы:

$$\frac{dz_{mp}(t)}{dt} = \frac{\xi(t)}{\tau_1}; \quad z_{mp}(0) = 0, \quad (11)$$

где $\xi(t)$ – входной сигнал, подлежащий определению.

При этом оптимальные значения углов установки лопаток НА должны обращать в минимум функционал обобщенной работы (ФОР):

$$J = \int_0^{t_p} \left(\frac{Md_{mp}(t) - Md(n_{mp}(t), z_{mp}(t), \gamma_{mp}(t))}{\Delta M_{\text{дон}}} \right)^2 dt + \alpha_1 \cdot \int_0^{t_3} \left(\frac{\xi(t)}{\Delta z_{\text{дон}}} \right)^2 dt, \quad (12)$$

где $0 < \alpha_1 < 1$ – параметр регуляризации.

Минимизация функционала (12) с помощью принципа максимума и инвариантного погружения возникающих уравнений Эйлера-Лагранжа [3] приводит к следующему алгоритму формирования углов установки лопаток НА:

$$\frac{dz_{mp}(t)}{dt} = \frac{L(t) \cdot V(t)}{\tau_1 \cdot \Delta M_{\text{дон}}^2} \cdot e(t); \quad z_{mp}(0) = 0; \quad (13)$$

$$e(t) = Md_{mp}(t) - Md(n_{mp}(t), z_{mp}(t), \gamma_{mp}(t)); \quad (14)$$

$$L(t) = \frac{\partial Md(n_{mp}(t), z_{mp}(t), \gamma_{mp}(t))}{\partial z_{mp}(t)}; \quad (15)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\Delta z_{\text{дон}}^2}{\alpha_1 \cdot \tau_1} - \frac{L(t) \cdot V(t)^2}{\tau_1 \cdot \Delta M_{\text{дон}}^2}; \quad V(0) = 1. \quad (16)$$

Требуемые значения углов поворота лопаток направляющего аппарата турбины, вычисленные по алгоритму (13) – (16), приведены на рис. 5 (сплошная линия).

Вычисленные значения $z_{mp}(t)$ используют в алгоритме формирования управляющих воздействий.

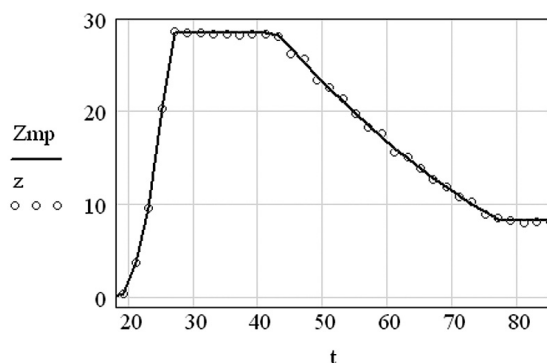


Рис. 5. Результаты регулирования угла установки лопаток НА

Алгоритм формирования управляющих воздействий

Управляющие воздействия предлагается определять минимизацией квадратичного ФОР:

$$I = \int_0^{t_p} \left\{ \frac{(n_{mp}(t) - n(t))^2 + s(t)^2}{\Delta n_{don}^2} + \left(\frac{z_{mp}(t) - z(t)}{\Delta z_{don}} \right)^2 \right\} dt + \int_0^{t_p} \left\{ \frac{(\gamma_{mp}(t) - \gamma(t))^2}{\Delta \gamma_{don}^2} + \alpha_2 \cdot \left(\frac{u_1(t)^2}{\Delta z_{don}^2} + \frac{u_2(t)^2}{\Delta \gamma_{don}^2} \right) \right\} dt,$$

где $0 < \alpha_2 < 1$ – параметр регуляризации;

$$s(t) = \frac{3}{t_p} \cdot \int_0^t (n_{mp}(t) - n(t)) dt.$$

Решение этой задачи оптимального управления выполнено с помощью принципа максимума с использованием инвариантного погружения возникающей двухточечной краевой задачи. В результате для формирования управляющих воздействий был получен многомерный ПИ-регулятор с переменными параметрами. Текущие значения параметров регулятора вычисляются интегрированием уравнения Риккати регуляризованного фильтра Калмана [3], составленного для рассматриваемой задачи оптимального управления.

Было выполнено имитационное моделирование процесса управления пуском турбины № 19 Волжской ГЭС с помощью разработанной системы управления. Результаты моделирования приведены

на рис. 3 – 5. Выполненные исследования показали, что разработанная система управления частотой вращения ротора астатическая, величина перерегулирования не превышает 0,5%, а время регулирования $t_p < 60$ с.

Заключение

Разработана адаптивная система управления частотой вращения ротора ГТ при пуске. Она содержит нелинейную обучаемую модель ОУ, многомерный самонастраивающийся ПИ-регулятор переменных состояния (частоты вращения и углов установки лопаток направляющего аппарата и рабочего колеса) и модуль формирования задания регулятору.

Получены алгоритмы автоматической настройки параметров регулятора, определения требуемого закона поворота лопаток направляющего аппарата и формирования управляющих воздействий, оптимальных по квадратичному функционалу обобщенной работы.

Литература

1. Электрические станции и сети. Сборник нормативных документов. – М.: Из-во НЦ ЭНАС, 2006. – С. 50-52.
2. Красовский А.А. Некоторые актуальные проблемы науки управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 5-14.
3. Гольцов А.С. Адаптивные системы автоматического управления нелинейными объектами. – Орел: Академия ФАПСи, 2001. – 156 с.
4. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 532 с.

Поступила в редакцию 18.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.