

И. Ф. Нугаев, д-р техн. наук, проф., inugaev@yandex.ru,

В. И. Васильев, д-р техн. наук, проф., vasilyev@ugatu.ac.ru,

Уфимский государственный авиационный технический университет

Управление процессами скважинной добычи нефти на основе каскадных алгоритмов

Рассматривается подход к повышению эффективности алгоритмов управления скважинной нефтедобычей на базе установок электроцентробежных насосов, основанный на применении принципа каскадного построения алгоритма управления, где в качестве каскадов выступают алгоритмы управления отдельными локальными слоями процесса. Обсуждается методика синтеза локальных алгоритмов управления на основе многоуровневой модели процесса.

Ключевые слова: автоматизация управления технологическими процессами, управление скважинной добычей нефти на базе установок электроцентробежных насосов, каскадные алгоритмы управления

Введение

Современные технологические процессы, как правило, относятся к классу сложных объектов управления, обладающих такими свойствами, как многослойность, многомерность, многосвязность. Методам построения алгоритмов управления объектами данного класса посвящены многочисленные труды (см., например [1, 3]). В качестве базового принципа управления здесь, как правило, рассматривается иерархический принцип, предполагающий построение локальных алгоритмов управления отдельными элементами сложного объекта и алгоритмов высших уровней, обеспечивающих координирование локальных. Обобщенная структура иерархической системы управления сложным объектом, представленная в работе М. Месаровича, Д. Мако, И. Такахара [1], имеет вид, показанный на рис. 1.

В то же время при практической разработке автоматизированных систем управления технологическими процессами авторами был выделен тип технологических процессов, обладающих свойствами, требующими специальных подходов к построению алгоритмов управления. В частности, это многослойные процессы с неуправляемыми внутренними слоями, представляющие собой последовательность локальных процессов (ЛП), постоянные времени τ_i которых существенно различаются (на порядки). Управляемыми параметрами Y здесь являются параметры процессов выходного слоя, а управляемыми параметрами U обладают процессы только входного слоя. При этом возмущающим воздействиям V подвергаются процессы всех слоев (рис. 2).

Очевидно, что в данном случае отсутствие возможности непосредственного управления локальными процессами делает неуместным известный принцип иерархического построения алгоритмов управления. Здесь традиционно строится алгоритм управления на основе упрощенного представления многослойного процесса в виде единого — однослойного, входом которого являются управляющие

параметры процессов входного слоя, а выходом — управляемые параметры процессов выходного слоя (рис. 3).

Анализ качества управления процессами на основе алгоритмов, построенных на основе данного подхода, показывает низкую эффективность компенсации возмущений, действующих на промежуточные слои процесса, что выражается в больших

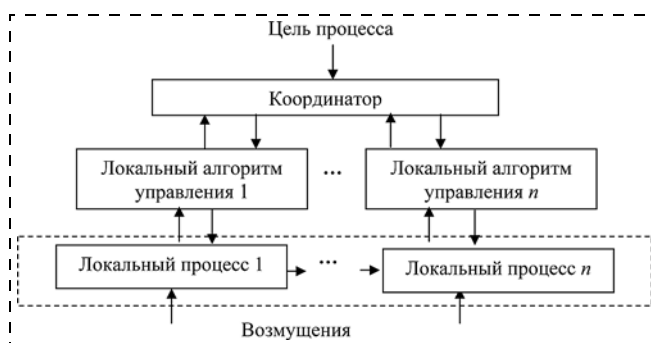


Рис. 1. Обобщенная структура иерархической системы управления многослойным процессом

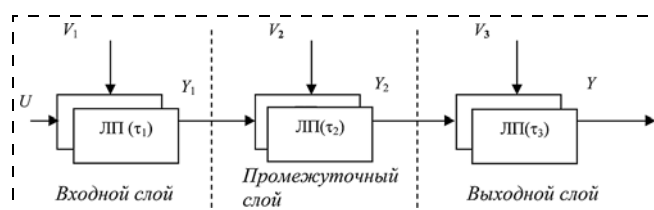


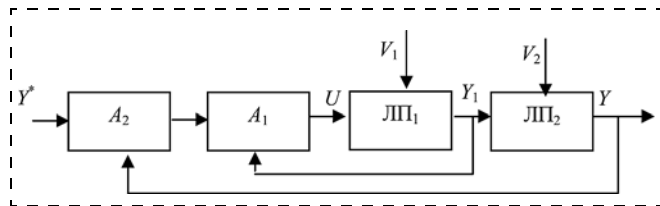
Рис. 2. Обобщенная структура многослойного процесса с неуправляемыми внутренними слоями: $\tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_3$



Рис. 3. Структура традиционной САУ многослойным процессом с неуправляемыми внутренними слоями

В качестве примера технологического процесса данного типа можно привести процесс нефтедобычи из продуктивного геологического пласта гидродинамическим способом. Здесь входной слой представляют процессы извлечения и нагнетания жидкости отдельными скважинами; промежуточный слой — процессы движения пластовой жидкости в зонах влияния скважин; выходной слой — процесс движения жидкости в продуктивном пласте. Управляющими параметрами здесь обладают отдельные скважины (первый слой); управляемыми параметрами являются параметры состояния жидкости пласта (третий слой). Таким образом, процессы второго и третьего слоев, подвергающиеся возмущающим воздействиям, не обладают прямыми управляющими параметрами [5].

В работе рассматривается подход к повышению эффективности управления многослойными процессами на основе известного каскадного принципа



построения алгоритмов управления, рассмотренного в работе Р. Изермана [2]. Принцип заключается в построении алгоритма в многокаскадной форме, где в качестве каскадов выступают алгоритмы A_i управления локальными процессами ЛП $_i$. На рис. 4 показан случай $i = 1, 2$.

Скважинная добыча нефти как многослойный процесс управления

На первом этапе жидкость из нефтеносного пласта вследствие разницы пластового давления $P_{\text{п}}$ и давления P_3 в забойной части скважины поступает в обсадную колонну. Данный процесс продолжается до достижения жидкостью статического уровня $H_{\text{с}}$, обеспечивающего выравнивание давлений $P_{\text{п}}$ и P_3 . На следующем этапе с помощью системы управления включается насосная установка, создающая давление $P_{\text{н}}$ в насоснокомпрессорных трубах, обеспечивающее извлечение жидкости из ОК в систему сбора нефти. При этом уровень жидкости в ОК снижается и устанавливается на динамическом уровне $H_{\text{д}}$, зависящем от потока (дебита) $Q_{\text{НКТ}}$ извлечения жидкости через НКТ. Очевидно, что уровень $H_{\text{д}}$ не должен опускаться ниже допустимого H_{min} , который определяется уровнем погружения УЭЦН, а также такими технологическими параметрами, как давление разгазирования нефти и др. Максимальный дебит Q обеспечивается при минимальном уровне жидкости в ОК: $Q_{\text{max}}: H_{\text{д}} = H_{\text{min}}$.

Анализ данного технологического процесса как объекта управления показал, что он имеет выраженную трехслойную структуру (рис. 6):

1) входной слой — локальный процесс создания давления P_n в УЭЦН; входной (управляющий) параметр $U = f$; выходной параметр $Y_1 = P_n$; возмущающее воздействие — изменение параметров центробежного насоса, таких как максимальный напор $V_1 = dH_0$;

2) промежуточный слой — локальный процесс движения жидкости в НКТ; входной (управляющий) параметр $Y_1 = P_n$; выходной параметр $Y_2 = Q_{\text{НКТ}}$;

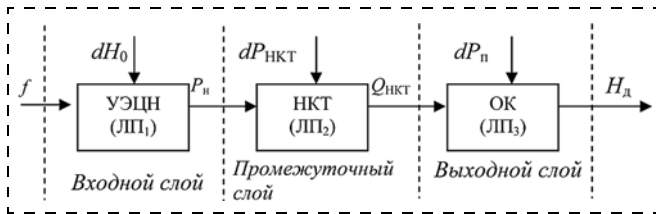


Рис. 6. Структура процесса нефтедобычи как многослойного объекта управления

возмущающее воздействие — изменение противодавления в НКТ, создаваемое системой сбора нефти: $V_2 = dP_{НКТ}$;

3) выходной слой — локальный процесс движения жидкости в ОК; входной параметр — $Y_2 = Q_{НКТ}$; выходной параметр — $Y = H_d$; возмущающее воздействие — изменение пластового давления: $V_3 = dP_n$.

Построение структуры каскадного алгоритма управления процессами скважинной нефтедобычи

Очевидно, что для эффективности компенсации внутренних возмущений $V_1, \dots, V_N$ необходимо строить алгоритм A вычисления управления U , который использует информацию о текущих значениях данных возмущений: $U = A(Y^*, V_1, V_2, \dots, V_N)$.

Для построения алгоритма данного типа предлагается применение многокаскадного принципа, рассмотренного в работе Изермана Р. [2]. Принцип заключается в построении алгоритма в многокаскадной форме, где в качестве каскадов выступают алгоритмы A_i управления локальными процессами. Целью локального алгоритма A_i является вычисление значения входного параметра Y_{i-1}^* локального процесса, обеспечивающего достижение требуемого значения входного параметра Y_i^* с учетом его текущего значения Y_i : $Y_{i-1}^* = A_i(Y_i^*, Y_i)$. Последовательность локальных алгоритмов данного типа формируется путем соединения их входов и выходов, начиная с алгоритма выходного слоя (рис. 7):

- алгоритм A_N локального процесса выходного слоя вычисляет требуемое значение Y_{N-1}^* выходного параметра Y_{N-1} локального процесса предпоследнего слоя на основе заданного требуемого значения Y^* выходного параметра процесса Y и его текущего состояния Y_N : $Y_{N-1}^* = A_N(Y^*, Y_N)$;
- алгоритм A_{N-1} локального процесса предпоследнего слоя вычисляет требуемое значение Y_{N-2}^* выходного параметра Y_{N-2} локального процесса $(N-2)$ -го слоя на основе полученного от алгоритма A_N требуемого значения Y_{N-1}^* выходного параметра Y_{N-1} и его текущего состояния Y_{N-1} : $Y_{N-2}^* = A_{N-1}(Y_{N-1}^*, Y_{N-1})$;
- алгоритм A_i i -го локального процесса i -го промежуточного слоя вычисляет требуемое значение Y_{i-1}^* выходного параметра Y_{i-1} локального процесса $(i-1)$ -го слоя на основе полученного от алгоритма A_{i-1} требуемого значения Y_i^* выходного параметра Y_i и его текущего состояния Y_i : $Y_{i-1}^* = A_i(Y_i^*, Y_i)$;

- алгоритм A_1 1-го локального процесса 1-го входного слоя вычисляет требуемое значение управляющих параметров U процесса на основе полученного требуемого значения Y_1^* выходного параметра Y_1 и его текущего состояния Y_1 : $U = A_1(Y_1^*, Y_1)$.

Таким образом, управление процессом осуществляется на основе информации о текущих значениях выходных параметров слоев: $U = A_i(Y^*, Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$. Учитывая то, что выходные параметры Y_i слоев определяются значениями их входных параметров Y_{i-1} и возмущающих воздействий V_i , в алгоритме управления можно провести замену $Y_i = W_i(Y_{i-1}, V_i)$. В результате алгоритм вычисления управления процессом принимает искомую форму:

$$U = A(Y^*, Y_2, Y_3, \dots, Y_{N-1}, V_1, V_2, \dots, V_N). \quad (1)$$

В результате в структуру каскадного алгоритма управления вводится возможность компенсировать локальные возмущающие воздействия непосредственно после их возникновения с помощью локальных алгоритмов. При этом длительность процесса компенсации возмущения локального слоя определяется ее собственной постоянной времени и постоянными времени предшествующих слоев. В частности длительность процесса компенсации возмущения первого локального слоя определяется только ее собственной постоянной времени.

Структура системы управления процессами скважинной добычи нефти с алгоритмами, построенными на каскадном принципе, показана на рис. 8.

Далее рассмотрим предлагаемую методику синтеза локальных алгоритмов управления.

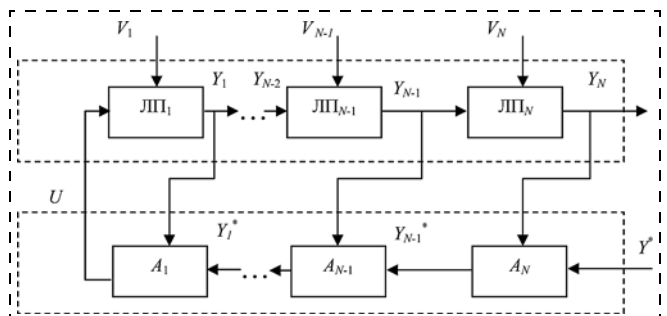


Рис. 7. Структура системы управления многослойным процессом на основе каскадного алгоритма управления

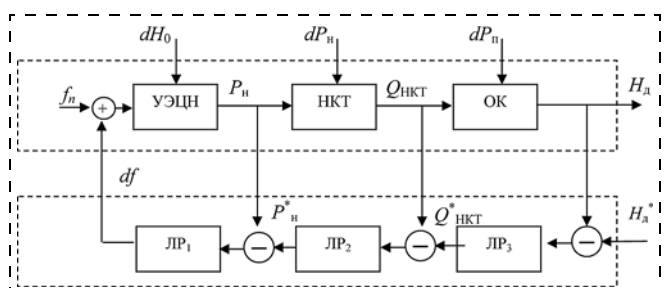


Рис. 8. Структура системы управления процессами скважинной нефтедобычи, построенной на каскадном принципе

Синтез локальных алгоритмов каскадного управления

Синтез локальных алгоритмов управления предлагается выполнять последовательно, начиная с первого (входного) слоя, на основе принципа регулирования с обратной связью по отклонению:

1) структура локальной системы управления (ЛСАУ₁) входного слоя, построенная на основе принципа регулирования по отклонению, имеет вид, показанный на рис. 9, а. Синтез алгоритма A_1 локального регулятора ЛР₁ выполняется на основе модели локального процесса первого слоя (ЛП₁) вида

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= F_1(X_1, U, V_1); \\ Y_1 &= \hat{F}_1(X_1, U) \end{aligned} \quad (2)$$

по критерию минимального времени T_1 отработки задающих Y_2^* и компенсации возмущающих воздействий V_1 : $U = A_1(Y_1 - Y_1^*)$; $T_1 \rightarrow \min$;

2) структура локальной системы управления (ЛСАУ₂) промежуточного слоя, построенная на основе принципа регулирования по отклонению, имеет вид, показанный на рис. 9, б. Синтез алгоритма A_2 локального регулятора ЛР₂ выполняется на основе объединенной модели ЛОУ₂ и ЛСАУ₁ вида

$$\begin{aligned} \frac{dX_2}{dt} &= F_2(X_2, Y_1^*, V_2); \\ Y_2 &= \hat{F}_2(X_2, Y_1^*); \\ \frac{dX_1}{dt} &= F_1(X_1, U, V_1); \\ Y_1 &= \hat{F}_1(X_1, U); U = A_1(Y_1 - Y_1^*) \end{aligned} \quad (3)$$

по критерию минимального времени T_2 отработки задающих Y_3^* и компенсации возмущающих V_2 воздействий: $Y_1^* = A_2(Y_2 - Y_2^*)$; $T_2 \rightarrow \min$;

3) структура локальной системы управления (ЛСАУ₃) выходного слоя, построенная на основе принципа регулирования по отклонению, имеет вид, показанный на рис. 9, в. Синтез алгоритма A_3 регулятора ЛР₃ выполняется на основе моделей ЛОУ₃, ЛСАУ₂ и ЛСАУ₁ вида

$$\begin{aligned} \frac{dX_3}{dt} &= F_3(X_3, Y_2^*, V_3); \\ Y_3 &= \hat{F}_3(X_3, Y_2^*); \\ \frac{dX_2}{dt} &= F_2(X_2, Y_1^*, V_2); \\ Y_2 &= \hat{F}_2(X_2, Y_1^*); Y_1^* = A_2(Y_2 - Y_2^*); \\ \frac{dX_1}{dt} &= F_1(X_1, U, V_1); \\ Y_1 &= \hat{F}_1(X_1, U); U = A_1(Y_1 - Y_1^*) \end{aligned} \quad (4)$$

по критерию минимального времени T_3 отработки задающих Y^* и компенсации возмущающих V_3 воздействий: $Y_2^* = A_2(Y_3 - Y^*)$; $T_3 \rightarrow \min$.

Для синтеза алгоритмов управления разработана многоуровневая система моделей указанных локальных процессов в форме переменных состояния [6]:

1) модель локального процесса первого уровня (УЭЦН)

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi J} \left(\frac{2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2}{\left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right)} - M_c \right); \\ P_H = \rho g \left(H_f \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 - S_f Q_{HKT}^2 \right), \end{cases}$$

где J , M_k , M_c , n , n_0 , n_n , Δn_k — соответственно момент инерции, критический момент, момент сопротивления, частота вращения, частота вращения на холостом ходу, номинальная частота, конструктивная постоянная вала электродвигателя; u , u_n , f , f_n — соответственно напряжение, номинальное напряжение, частота, номинальная частота питания электродвигателя; H_f , S_f — соответственно максимальный напор и сопротивление насоса; ρ — плотность добываемой жидкости;

2) модель локального процесса второго уровня (НКТ)

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{S_{HKT}}{\rho L_{HKT}} (P_{HKT} - P_H) - \frac{32 L_{HKT} \eta}{D^2} Q_{HKT},$$

где L_{HKT} , S_{HKT} — соответственно длина и площадь сечения НКТ; P_{HKT} — статическое давление, создаваемое столбом жидкости в НКТ;

3) модель локального процесса третьего уровня (ОК):

$$\begin{cases} \frac{dP_3}{dt} = \frac{\rho g}{S_{OK}} \left(\frac{\eta \ln \left(\frac{R_{\Pi}}{R_c} \right)}{2\pi k_{\Pi} h} (P_{\Pi} - P_3) - Q_{HKT} \right); \\ H_d = \frac{1}{\rho g} P_3, \end{cases}$$

где R_{Π} , h , k_{Π} — соответственно радиус, толщина, проницаемость пласта; S_{OK} — площадь ОК.

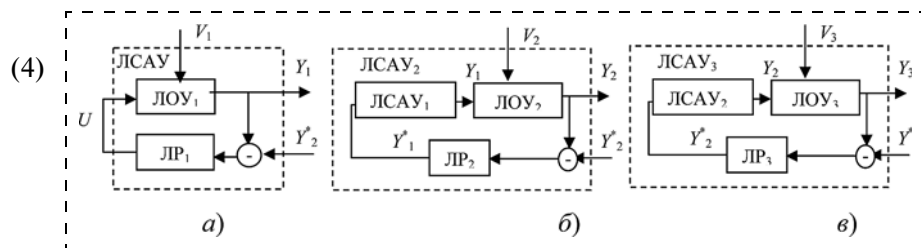


Рис. 9. Структуры локальных систем управления

Постоянные времени слоев процесса существенно различаются: $\tau_{уэцн} \approx 60...100$ с; $\tau_{нкт} \approx 600...1000$ с; $\tau_{ок} \approx (1...3)10^4$ с; $\tau_{уэцн} \ll \tau_{нкт} \ll \tau_{ок}$.

В результате синтеза по критерию минимального времени процессов обработки задающего и возмущающих воздействий были получены алгоритмы локальных регуляторов вида

$$A_1: f = 2,2 \cdot 10^{-6}(P_n^* - P_n);$$

$$A_2: P_n^* = 10^6(Q_{нкт}^* - Q_{нкт}) + 5 \cdot 10^2 \int_0^t (Q_{нкт}^* - Q_{нкт})dt;$$

$$A_3: Q_{нкт}^* = 8 \cdot 10^{-2}(H_d^* - H_d) + 0,5 \cdot 10^{-5} \int_0^t (H_d^* - H_d)dt.$$

На рис. 10 показаны процессы обработки возмущений ступенчатой формы, последовательно действующих во всех слоях объекта:

$$V_1 = \begin{cases} 0, & t \leq 10^4 \text{ с;} \\ dH_0 = 50 \text{ м,} & t > 10^4 \text{ с;} \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} 0, & t \leq 1,6 \cdot 10^4 \text{ с;} \\ dH_{нкт} = 50 \text{ м,} & t > 1,4 \cdot 10^4 \text{ с;} \end{cases}$$

$$V_3 = \begin{cases} 0, & t \leq 2,5 \cdot 10^4 \text{ с;} \\ dP_n = 1 \text{ МПа,} & t > 1,85 \cdot 10^4 \text{ с.} \end{cases}$$

Для сравнительного анализа эффективности многослойного алгоритма был проведен синтез традиционного однослойного алгоритма системы управления, показанной на рис. 11.

В результате синтеза по критерию минимального времени процессов обработки задающего и возмущающих воздействий был получен пропорционально-интегральный регулятор:

$$df = 0,02(H_d^* - H_d) + 0,05 \cdot 10^{-5} \int_0^t (H_d^* - H_d)dt.$$

На рис. 12 показаны процессы компенсации по выходу H_d возмущений ступенчатой формы, последовательно действующих во всех слоях объекта:

$$V_1 = \begin{cases} 0, & t \leq 10^4 \text{ с;} \\ dH_0 = 50 \text{ м,} & t > 10^4 \text{ с;} \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} 0, & t \leq 1,4 \cdot 10^4 \text{ с;} \\ dH_{нкт} = 50 \text{ м,} & t > 1,4 \cdot 10^4 \text{ с;} \end{cases}$$

$$V_3 = \begin{cases} 0, & t \leq 1,85 \cdot 10^4 \text{ с;} \\ dP_n = 1 \text{ МПа,} & t > 1,85 \cdot 10^4 \text{ с.} \end{cases}$$

Из диаграмм рис. 10 и рис. 12 видно, что характер реакции выходных параметров на возмущения

внутренних слоев существенно различается. При управлении однокаскадным алгоритмом процессы компенсации практически идентичны вследствие их прохождения через все слои процесса и определяются постоянной времени процесса:

- $V_1: \Delta H_{дmax} = -50$ м; $\Delta t = 1,5 \cdot 10^4$ с;
- $V_2: \Delta H_{дmax} = 50$ м; $\Delta t = 0,4 \cdot 10^4$ с;
- $V_3: \Delta H_{дmax} = 30$ м; $\Delta t = 0,4 \cdot 10^4$ с.

При управлении каскадным алгоритмом характер реакции выходных параметров на возмущения

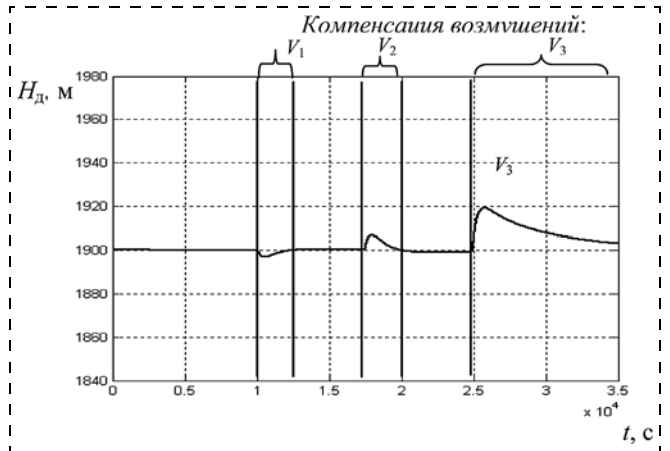


Рис. 10. Процессы компенсации возмущений каскадным алгоритмом управления

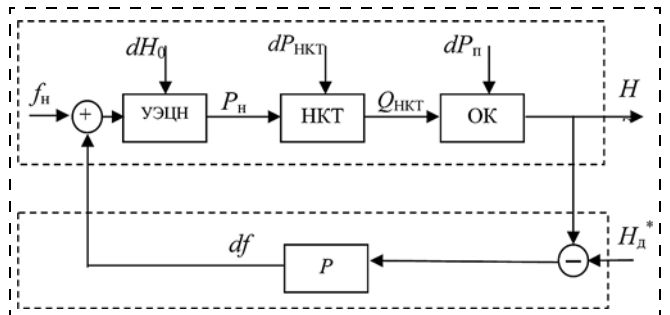


Рис. 11. Структура системы управления на основе однокаскадного алгоритма управления

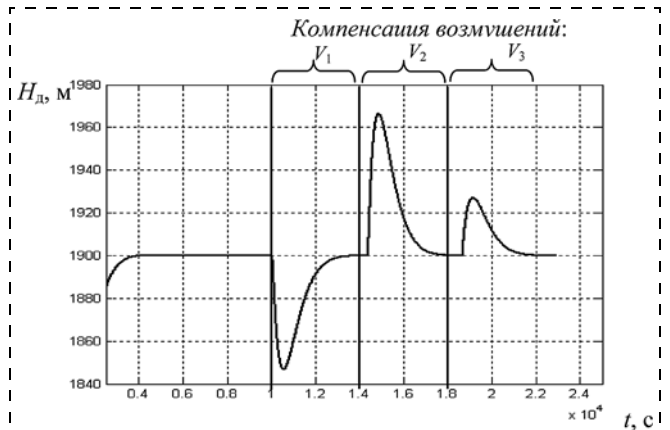


Рис. 12. Процессы компенсации возмущений ступенчатой формы однокаскадным алгоритмом управления

внутренних слоев определяется постоянной времени локальных объектов:

- $V_1: \Delta H_{\text{дmax}} = -1 \text{ м}; \Delta t = 0,1 \cdot 10^4 \text{ с};$
- $V_2: \Delta H_{\text{дmax}} = 5 \text{ м}; \Delta t = 0,2 \cdot 10^4 \text{ с};$
- $V_3: \Delta H_{\text{дmax}} = 20 \text{ м}; \Delta t = 1 \cdot 10^4 \text{ с}.$

По графикам видно, что по сравнению с однокаскадным алгоритмом амплитуда реакции на возмущение первого слоя уменьшилась в 60 раз, второго слоя — уменьшилась в 15 раз, третьего слоя — практически не изменилась.

Заключение

В результате исследований принципов построения алгоритмов управления многослойными технологическими процессами с неуправляемыми внутренними слоями на примере управления процессами скважинной добычи нефти показана эффективность применения каскадного принципа. Эффективность оценивалась с точки зрения влияния возмущений внутренних слоев на выходные

параметры процесса. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов показывает существенное снижение влияния возмущений на выходные параметры процесса по мере их удаления от выходного слоя при применении каскадного алгоритма управления по сравнению с традиционными алгоритмами.

Список литературы

1. Месарович М., Мако Д., Такахаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
3. Васильев В. И., Гусев Ю. М., Ефанов В. Н. и др. Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987. 309 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
5. Владимиров И. В., Хисамутдинов Н. И., Тазиев М. М. Проблемы разработки водонефтяных и частично заводненных зон нефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 2007. 360 с.
6. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления // Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 31—46.

Use of Multi-Cascade Principle for the Downhole Oil Production Control

I. F. Nugaev, inugaev@yandex.ru, V. I. Vasilyev, vasilyev@ugatu.ac.ru,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation

Received on July 01, 2014

The topic of this paper is methodology for improvement of the efficiency of the downhole oil production control algorithms. The approach is based on the use of the well-known multi-cascade principle, in which the cascades represent the control algorithms of separate local layers of the process. The results of investigation of the multi-layered control principles on the example of the downhole oil production control process show the efficiency of application of the cascade control principle. The downhole oil production is considered as a multilayer control process: 1) Input layer — the local process of creation of pressure in an electrical submersible pump (ESP); 2) Inner layer — the local process of the fluid motion in the pump-compressor pipes; 3) Output layer — the local process of the fluid motion in the casing well. According to the principle of the cascade control, the control algorithm consists of several cascades (local control algorithms). Each local algorithm calculates the set value for the next algorithm on the basis of the current value of the output parameter for the respective local process. As a result, the control algorithm immediately takes into account the current disturbances of all the previous layers. Duration of the compensation process of the local layer disturbance is determined by its own time constant. The paper presents a methodology for the local control algorithms design. The design procedure begins from the first (input) process layer. The design of the local algorithms is determined by the criterion of the minimum regulation time with the use of the model of the local process layer. The efficiency was assessed from the point of view of the influence of the inner layers' disturbances on the output parameters of the considered technological process. Analysis of the results of the computation experiments demonstrates a significant decline of the influence of the inner disturbances on the output parameters, when the multi-cascade control algorithm is compared with the use of the conventional control algorithms.

Keywords: automated control systems, technological processes, downhole oil production, electrical submersible pump, multi-cascade principle

For citation:

Nugaev I. F., Vasilyev V. I. Use of Multi-Cascade Principle for the Down-hole Oil Production Control, *Mekatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 321—326.

DOI: 10.17587/mau.16.321-326

References

1. Mesarovic M., Mako D., Takahara Y. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* (Theory of hierarchical multi-level systems), Moscow, Mir, 1973 (in Russian).
2. Isermann R. *Tsifrovye sistemy upravleniya* (Digital control systems), Moscow, Mir Pub, 1984 (in Russian).
3. Gusev Yu. M., Efanov V. N., Krymskii V. G., Rutkovskii V. Yu., Semeran V. A., Rutkovskii V. Yu. *Mnogourovnevnoe upravlenie dinamicheskimi ob'ektami* (Multi-level control of dynamic objects), Moscow, Nauka Pub., 1987 (in Russian).

4. Krasovsky A. A. ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Guide of the theory of automatic control), Moscow, Nauka, 1987 (in Russian).

5. Vladimirov I. V., Khisamutdinov N. I., Taziev M. M. *Problemy razrabotki vodoneftyanykh i chastichno zavodnennykh zon neftyanykh mestorozhdenii* (Problems of development of water-oil and partially flooded areas of oil fields), Moscow, VNIIOENG, 2007 (in Russian).

6. Nugaev I. F., Iskozhin R. V. Dynamic model of oil production on the basis of ESP as control object, *Electronic scientific journal Oil-Gas Industry*, 2012, no. 5.

Corresponding author.

Nugaev Il'dar F., D. Sc, Professor of the Department of Electronics and Biomedical Technology, Ufa State Aviation Technical University, Lenin Str., 2, 51, Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: inugaev@yandex.ru