

# ЧАСТОТНОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ

В.А. Александров, М.В. Паленов, Д.В. Шатов

Исследована возможность применения частотной адаптации к процессу управления бурением с контролируемым давлением. Отмечено, что основная задача заключается в поддержании постоянного давления в затрубном пространстве при наличии в системе внешних возмущений и дрейфе ее параметров при изменении глубины скважины. Для ее решения предложено использовать частотную адаптацию, построена адаптивная система управления давлением в затрубном пространстве. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований на установке, реализующей технологию бурения с контролируемым давлением.

**Ключевые слова:** частотная адаптация, линеаризация, ПИД-управление, бурение, технология MPD.

## ВВЕДЕНИЕ

Бурение скважин — сложная инженерная работа, требующая решения различных технических задач и построения системы управления буровой установкой. Быстрое развитие нефте- и газодобывающих отраслей промышленности стало стимулом к появлению новых и развитию существующих технологий бурения [1]. Одной из таких технологий является бурение с контролируемым давлением (Managed Pressure Drilling, MPD). В настоящей статье описывается применение алгоритма адаптации на основе конечно-частотной идентификации для решения задач, возникающих при использовании данной технологии.

В процессе бурения насос накачивает специальный раствор в бурильную колонну. Этот раствор создает давление (гидростатическое благодаря весу раствора и динамическое, создаваемое насосом) на буровое долото, которое позволяет преодолеть сопротивление породы. Главный привод вращает долото и разрушает породу. Далее, проходя через отверстия внутри долота, буровой раствор выходит в затрубное пространство и поднимается вверх по стволу скважины, унося с собой измельченную долотом породу. После выхода на поверхность раствор проходит через вибросито, которое удаляет из него частицы породы. Затем

раствор поступает в хранилище бурового раствора, из которого снова накачивается бурильным насосом в колонну.

При бурении скважин необходимо контролировать давление  $p_b$  на дне скважины (колодца). Давление следует поддерживать в строго определенных границах, называемых «окном давления». Эти границы определяются особенностями места бурения и характеристиками породы, которую необходимо пробурить.

Нижняя граница  $\underline{p}_b$  допустимого давления определяется поровым давлением, т. е. давлением, под которым находится жидкость в породе. Если давление на дне колодца будет меньше порового, то из породы может начаться приток жидкости, что нежелательно. Верхняя граница  $\overline{p}_b$  определяется давлением гидроразрыва породы — давлением, при котором порода растрескивается и в ней образуются разломы, что также нежелательно, так как приводит к потере бурового раствора.

Давление на дне колодца складывается из суммы действующих давлений:

$$p_b = p_H + p_p, \quad (1)$$

где  $p_H = \rho gh$  — гидростатическое давление бурового раствора (давление столба жидкости), определяемое концентрацией  $\rho$  раствора и глубиной  $h$

скважины,  $g$  — ускорение свободного падения,  $p_p$  — динамическая составляющая давления, создаваемая буровым насосом. Концентрация служит одним из расчетных параметров при проектировании скважин, изменяя ее, можно менять гидростатическое давление, но с очень высокой инерционностью, что не годится для оперативного управления давлением. Давление  $p_p$  обеспечивает циркуляцию бурового раствора, его уровень зависит от потока, создаваемого насосом. Оно является динамической величиной, с помощью которой можно регулировать давление  $p_b$ .

При реальном бурении профиль давления породы в месте бурения почти всегда отличается от теоретического и может быть существенно уже или носить трудный для бурения характер. Даже в тех случаях, когда окно давления известно, в процессе бурения можно встретить аномалию в породах, которая негативно скажется на качестве бурения. Предсказать такие аномалии очень трудно, и в таких случаях необходимо оперативно изменять давление  $p_b$ .

Для повышения качества и эффективности процесса бурения применяется технология МРД, которая сформировалась относительно недавно. Международная ассоциация бурильных подрядчиков внесла ее в список технологий бурения лишь в 2003 г. Суть ее заключается в герметизации устья скважины и установке управляемой дроссельной заслонки, контролирующей поток бурового раствора через затрубное пространство. Положение заслонки также определяет давление бурового раствора на стены скважины, при этом цель управления заключается в обеспечении некоторого заданного давления раствора. Существует два основных направления в МРД.

Одно называется «проактивное», такой тип бурения с контролируемым давлением применяется к новым скважинам, когда изначально предполагается, что будет использоваться полный набор средств для контроля давления на дне скважины. При таком подходе можно максимально использовать преимущества МРД.

Другое направление представляет «реактивное» МРД. Оно применяется к старым скважинам или к новым, но лишь на определенном этапе бурения. В этой разновидности МРД используется только механизм дроссельной заслонки, позволяющий сгладить изменения в давлении на дне скважины, возникающие из-за внешних возмущений, постепенного углубления скважины и изменений режимов работы бурильного насоса.

Опишем процесс бурения с контролируемым давлением более строго.

## 1. ЗАДАЧА КОНТРОЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Уравнение (1) баланса давлений на дне колодца при «реактивном» МРД имеет вид

$$p_b = p_H + p_p + p_c \quad (2)$$

где  $p_c$  — составляющая давления, появившаяся благодаря добавлению в систему дроссельной заслонки. Она носит динамический характер и используется для управления давлением на дне скважины.

Задача МРД заключается в поддержании давления (2) в заданных пределах:  $p_b(t) \in [p_b^-(t), \bar{p}_b^+(t)]$ , причем она осложняется тем, что функция  $p_b(t)$  измеряется с большой погрешностью и достаточно редко.

Процессы, происходящие при бурении, описываются сложными уравнениями в частных производных, коэффициенты этих уравнений нестационарные и меняются по мере увеличения глубины скважины, но зачастую их заменяют более простыми динамическими моделями невысоких порядков [2, 3]. На рис. 1 изображена схема буровой установки, реализующая реактивное МРД. Из хранилища бурового раствора бурильный насос накачивает раствор в бурильную колонну, далее раствор проходит через бурильное долото по затрубному пространству на поверхность. Устье колодца герметизировано, а весь раствор проходит через дроссельную заслонку, которая позволяет контролировать давление в затрубном пространстве.

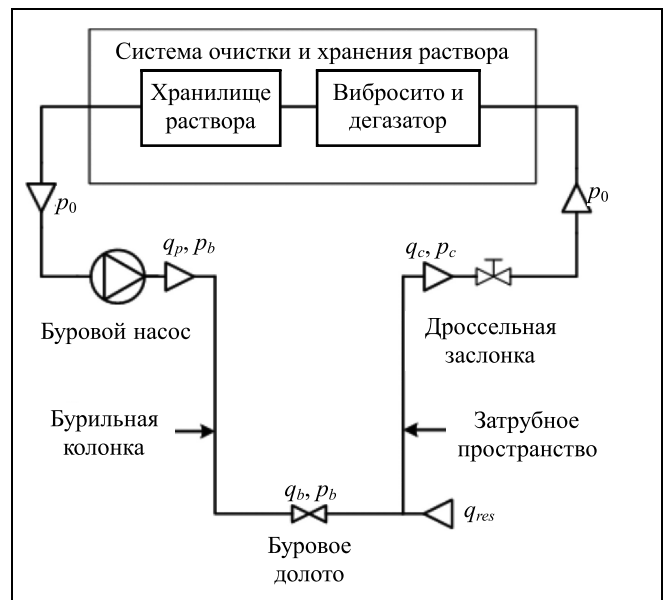


Рис. 1. Схема буровой установки с контролируемым давлением



Для буровой колонны и затрубного пространства справедливы уравнения, описывающие динамику давления в этих объемах и основанные на балансе масс:

$$\frac{V_d}{\beta_d} \dot{p}_p = q_p - q_b, \quad (3)$$

$$\frac{V_a}{\beta_a} \dot{p}_c = -\dot{V}_a + q_b + q_{res} - q_c, \quad (4)$$

где  $V_d$  — объем буровой колонны,  $\beta_d$  — коэффициент сжимаемости в колонне,  $p_p$  — давление, создаваемое насосом,  $q_p$  — поток через буровой насос,  $q_b$  — поток через долото,  $V_a$  — объем затрубного пространства,  $\beta_a$  — коэффициент сжимаемости в затрубном пространстве,  $p_c$  — давление на заслонке,  $q_{res}$  — поток из породы,  $q_c$  — поток через заслонку.

Поток через долото записывается, в силу закона сохранения импульса, как

$$(M_a + M_d) \dot{q}_b = p_p - p_c - F_d q_b^2 - F_a (q_b + q_{res})^2 + (\rho_d - \rho_a) g h_b, \quad (5)$$

где  $M_a$  и  $M_d$  — массовые коэффициенты затрубного пространства и колонны,  $\rho_a$  и  $\rho_d$  — средние плотности раствора в затрубном пространстве и колонне,  $F_a$  и  $F_d$  — коэффициенты трения в колонне и затрубном пространстве.

Уравнение потока раствора через заслонку в зависимости от ее положения:

$$q_c = k_c z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_0} (p_c - p_0)}, \quad (6)$$

где  $k_c$  — коэффициент усиления заслонки,  $z_c$  — положение заслонки в процентах открытия/закрытия,  $p_0$  — атмосферное давление,  $\rho_0$  — плотность раствора при атмосферном давлении.

Давление  $p_b$  на дне скважины описывается уравнением

$$p_b = p_c + M_a \dot{q}_b + F_a (q_b + q_{res})^2 + \rho_a g h_b. \quad (7)$$

На основе подобных моделей, используя уравнение (7), строятся различные подходы к решению задачи контроля давления на дне скважины и в затрубном пространстве. Кратко рассмотрим основные из них.

В работе [4] предлагается для определения функции  $p_b(t)$  воспользоваться присоединенным модифицированным фильтром Калмана. В таком

фильтре для расчетов используются не линеаризованные уравнения модели, а непосредственно нелинейные. Он называется присоединенным, поскольку в вектор состояния фильтра входят не только переменные состояния модели, но и ее параметры, содержащие неопределенность, которые оцениваются одновременно с искомыми состояниями модели.

Авторы статьи [5] предлагают использовать известную схему построения систем управления с предсказателем. Так как модель скважины описывается нелинейными уравнениями, то и для решения задачи применяется нелинейный вариант управления с предсказателем. Для управления бурением в реальном времени в статье предлагается использовать упрощенную модель скважины невысокого порядка, приводится сравнение с результатами расчетов для полной модели скважины.

В работе [6] задача поддержания  $p_b(t)$  в заданных границах решается с помощью адаптивного наблюдателя [2], оценивающего неизвестные параметры модели процесса бурения скважины. Далее, используя найденные оценки, строится алгоритм адаптивного  $L_1$  — управления.

В работе [7] для определения давления  $p_b(t)$  и ряда дополнительных параметров применяется адаптивный наблюдатель. Закон управления строится в виде регулятора с переключением. Моменты переключения определяются неравенствами, куда входят дополнительные параметры наблюдателя.

Приведенный перечень работ, решающих задачу контроля давления при МРД, показывает, что применение алгоритмов адаптивного управления в данном случае логично и естественно. Один из видов адаптивного управления предполагает применение частотной адаптации [8], которая имеет определенные преимущества по сравнению с описанными алгоритмами управления. В отличие от работы [5], где для расчета выхода модели решаются уравнения в частных производных, частотная адаптация не требует больших вычислительных мощностей, и она эффективно работает в режиме реального времени. Предложенные в работах [2, 4, 6, 7] алгоритмы управления заслонкой требуют разработки сложного программного обеспечения, тогда как при частотной адаптации используется стандартный блок ПИД-управления, к которому подключен блок частотной адаптации. Благодаря этому достигается также гибкость при модификации алгоритма управления заслонкой. Далее рассматривается применение частотной адаптации для контроля давления на реальной буровой установке.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ АДАПТАЦИИ

Для реализации частотной адаптации использовалась технологическая установка для «реактивного» МРД, которое не дает всех преимуществ этой технологии, однако позволяет улучшить качество процесса бурения благодаря уменьшению влияния внешних возмущений и позволяет скомпенсировать нестационарность объекта управления, в качестве которого в экспериментах была специальная установка. Она представляла собой упрощенную, без реальной буровой вышки, систему, схема которой изображена на рис. 1. В установке отсутствовало бурильное долото и поток, создаваемый насосом, сразу подавался на дроссельную заслонку. Таким образом, вместо уравнений (3)–(5) динамику объекта можно описать одним уравнением баланса масс

$$\frac{V_a}{\beta_a} \dot{p}_c = q_p - q_c. \quad (8)$$

Оно получено отбрасыванием уравнения (5), так как в установке нет бурового долота, и объединением уравнений (3) и (4). Внешние возмущения  $-\dot{V}(t)$  и  $q_{res}(t)$  из уравнения (4) в экспериментальной установке отсутствуют. Функция потока через заслонку описывается уравнением связи (6). Подставив его в уравнение (8), получим дифференциальное уравнение, описывающее динамику установки:

$$\frac{V_a}{\beta_a} \dot{p}_c = q_p - k_c z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_0}(p_c - p_0)}.$$

В насосе содержится собственная система регулирования, обеспечивающая постоянство создаваемого им потока, поэтому можно принять  $q_p = \text{const}$ .

$$\text{Обозначим } f(p_c, z_c) = \frac{\beta_a}{V_a} \left[ q_p - k_c z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_0}(p_c - p_0)} \right],$$

тогда

$$\dot{p}_c = f(p_c, z_c). \quad (9)$$

В установившемся режиме (после окончания переходных процессов) для некоторых достигнутых значений  $p_c^*$  и  $z_c^*$  имеем равенство  $\dot{p}_c = f(p_c^*, z_c^*) = 0$ .

Предположим, что возникли некоторые отклонения от установившегося положения

$$p_c(t) = p_c^* + \Delta p_c(t),$$

$$z_c(t) = z_c^* + \Delta z_c(t).$$

Подставим эти переменные в уравнение (9) и применим разложение в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \dot{p}_c^* + \Delta \dot{p}_c &= f(p_c^*, z_c^*) + \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial p_c} \Delta p_c + \\ &+ \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial z_c} \Delta z_c + l(t). \end{aligned}$$

Пренебрегая величиной  $l(t)$ , которую считаем меньше  $\Delta p_c$  и  $\Delta z_c$ , и учитывая, что в установившемся режиме  $\dot{p}_c = f(p_c^*, z_c^*) = 0$ , получим линеаризованное уравнение модели установки

$$\Delta \dot{p}_c = \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial p_c} \Delta p_c + \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial z_c} \Delta z_c.$$

Опустив символ  $\Delta$  и вводя обозначения  $a = \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial p_c}$ ,  $b = \frac{\partial f(p_c^*, z_c^*)}{\partial z_c}$ , окончательно имеем

$$\dot{p}_c = ap_c + bz_c. \quad (10)$$

Уравнение (10) можно представить в виде передаточной функции с помощью преобразования Лапласа

$$p_c = \frac{k_p}{T_s + 1} z_c,$$

где  $k_p = b/a$  — коэффициент усиления, а  $T = 1/a$  — постоянная времени.

К полученной передаточной функции объекта управления добавим звено запаздывания, которое может встречаться в системах управления с гидравлическими составляющими. В итоге объект управления описывается уравнением

$$p_c = \frac{k_p}{T_s + 1} e^{-\tau s} z_c. \quad (11)$$

В работах [8, 9] предлагается использовать для адаптации к меняющимся во времени параметрам объекта (11) адаптивный регулятор, построенный с помощью алгоритмов конечно-частотной идентификации и позволяющий найти параметры объекта управления в условиях действия внешнего возмущения. На основе предложенных в этих работах алгоритмов был разработан и реализован настройщик систем автоматического регулирования с ПИД-регуляторами [10, 11]. Рассмотрим применение данного настройщика для управления буровой установкой.



Уравнение объекта имеет вид:

$$T^{[i]}\dot{y}(t) + y(t) = k_p^{[i]}u(t - \tau^{[i]}) + f(t),$$

$$t^{[i]} \leq t < t^{[i+1]},$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N - 1,$$

где  $y(t) = p_c(t)$  — измеряемый выход объекта,  $u(t) = z_c(t)$  — управляющее воздействие,  $f(t)$  — неизвестное ограниченное внешнее возмущение, действующее на объект,  $i$  — номер режима работы объекта (их число равно  $N$ ). Числа  $k_p^{[i]}$ ,  $T^{[i]}$ ,  $\tau^{[i]}$  — параметры объекта управления, которые изменяются в момент времени  $t^{[i]}$  и сохраняют свои значения на интервалах времени  $t^{[i]} \leq t < t^{[i+1]}$ , которые достаточно велики. Режимам работы такого объекта соответствуют различные установившиеся значения  $p_c^*$  и  $z_c^*$ , около которых проводится линеаризация.

ПИД-регулятор описывается уравнением:

$$g^{[i]}\dot{u}(t) + u(t) = k_c^{[i]}\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i^{[i]}}\int_0^t \varepsilon(t)\tilde{d}\tau + T_d^{[i]}\dot{\varepsilon}(t),$$

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t), \quad (12)$$

где  $g^{[i]}$ ,  $k_c^{[i]}$ ,  $T_i^{[i]}$ ,  $T_d^{[i]}$  — коэффициенты ПИД-регулятора,  $y^*(t)$  — задающее воздействие (уставка),  $\varepsilon(t)$  — ошибка слежения. Параметры регулятора рассчитываются, исходя из модели объекта, и также остаются постоянными для каждого режима работы объекта.

Для сохранения системой устойчивости и поддержания требуемого качества регулирования при изменении параметров объекта требуется соответствующее изменение коэффициентов регулятора.

Настройщик служит для идентификации коэффициентов модели объекта и вычисления коэффициентов регулятора (12). Для работы настройщика используются те же сигналы  $u(t)$  и  $y(t)$ , что и в процессе идентификации. Кроме того, для проведения идентификации необходимо на вход регулятора подавать испытательный сигнал.

Работа настройщика построена следующим образом. К ошибке слежения, подаваемой на вход регулятора, добавляется испытательный сигнал, в результате она принимает вид:

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t) + v(t),$$

где  $v(t)$  — сигнал вида:

$$v^{[i]}(t) = \rho_1^{[i]}\sin(\omega_1^{[i]}t) + \rho_2^{[i]}\sin(\omega_2^{[i]}t),$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N - 1,$$

где  $\omega_k^{[i]} = \frac{k}{2T}$ ,  $k = 1, 2$  — частоты испытательного сигнала,  $\rho_k^{[i]}$ ,  $k = 1, 2$  — амплитуды испытательного сигнала, выбираемые из условия  $\rho_1 + \rho_2 < \eta\gamma^*$ , где  $\eta$  — положительное число.

В настройщик поступают сигналы управления с регулятора и выход объекта, они проходят через фильтры Фурье:

$$a_{yk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}t_f} \int_{T_F}^{T_f+t_f} y(t)\sin(\omega_k^{[i]}t)dt$$

$$b_{yk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}t_f} \int_{T_F}^{T_f+t_f} y(t)\cos(\omega_k^{[i]}t)dt,$$

$$a_{uk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}t_f} \int_{T_F}^{T_f+t_f} u(t)\sin(\omega_k^{[i]}t)dt$$

$$b_{uk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}t_f} \int_{T_F}^{T_f+t_f} u(t)\cos(\omega_k^{[i]}t)dt,$$

$$k = 1, 2, i = 0, 1, 2, \dots, N - 1,$$

где  $T_F$  — момент начала фильтрации испытательного сигнала,  $t_f$  — время фильтрации сигнала. После окончания фильтрации ищутся, согласно работе [7], оценки коэффициентов объекта в текущем режиме  $\hat{T}^{[i]}$ ,  $\hat{k}_p^{[i]}$ ,  $\hat{\tau}^{[i]}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

После завершения идентификации по найденным коэффициентам объекта рассчитываются коэффициенты ПИД-регулятора (12). В экспериментах применялся метод внутренней модели [12], согласно которому коэффициенты ПИД-регулятора

$$g = \frac{\lambda\tau}{2(\lambda + \tau)}, \quad k_c = \frac{2T + \tau}{2k_p(\lambda + \tau)},$$

$$T_i = T + \frac{\tau}{2}, \quad T_d = \frac{\tau T}{2T + \tau}, \quad (13)$$

где  $\lambda = T/[2 \div 4]$  — параметр быстродействия регулятора.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### 3.1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на технологической установке фирмы «Optimal Pressure Control», состоящей из насоса, верхней части буровой установки, заслонки и трубной обвязки, измерителя потока, системы очистки и хранилища раствора.



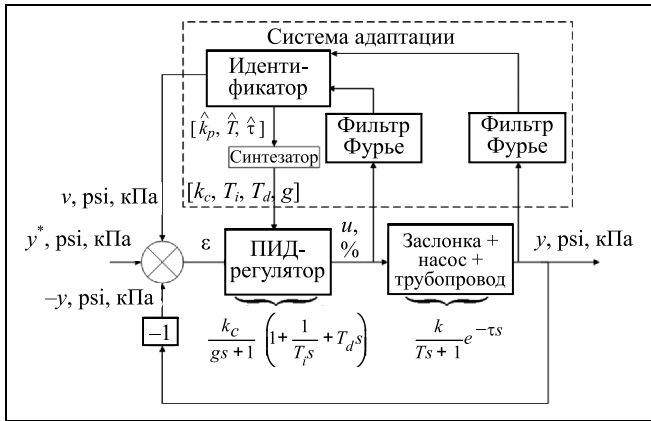


Рис. 2. Схема экспериментальной установки МРД с системой адаптации

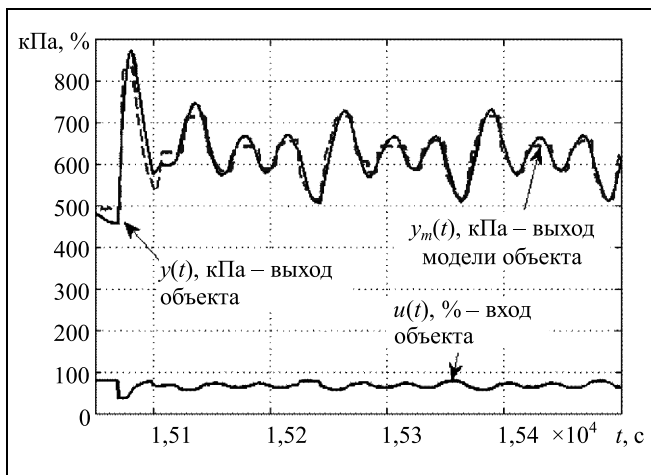


Рис. 3. Переходные процессы при эксперименте с испытательным сигналом в виде трех гармоник

Также использовалась система управления заслонкой: контроллер фирмы «Emerson», реализующий ПИД-управление заслонкой и система информационного обеспечения с автоматизированным рабочим местом оператора.

На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки с системой адаптации, построенной на базе настройщика. В ходе экспериментов с объекта снимались входной сигнал  $u$  — положение заслонки в процентах и выходной сигнал  $y$  — давление перед заслонкой в единицах psi (фунт на квадратный дюйм) или в килопаскалях (кПа). По этим сигналам, согласно описанному выше алгоритму идентификации, рассчитывались оценки параметров  $\hat{k}_p$ ,  $\hat{T}_i$ ,  $\hat{\tau}$  объекта (10). Далее согласно формулам (13) определялись коэффициенты регулятора (12).

### 3.2. Верификация принятой модели технологической установки МРД

В ходе экспериментов на установке исследовалась корректность использования линеаризованной модели объекта (11). На объект подавался испытательный сигнал в виде суммы трех гармоник, чтобы проверить наличие у системы нескольких значимых постоянных времени. Требуемое давление составляло  $y^* = 80 \text{ psi} \approx 551 \text{ кПа}$ , эксперимент проводился в замкнутом контуре с известным ПИД-регулятором, обеспечивающим устойчивость системы при данной уставке.

Испытательный сигнал задавался в виде:

$$v(t) = 23\sin(0,05t) + 46\sin(0,1t) + 70\sin(0,15t), \text{ кПа.}$$

После идентификации была получена передаточная функция объекта управления:

$$w(s) = \frac{11,56(s^2 + 0,0267s + 0,024)}{(6,25s + 1)(s^2 + 0,0269s + 0,023)}.$$

Числитель и знаменатель идентифицированной передаточной функции объекта содержат практически равные, устойчивые полиномы, из чего следует, что полученная передаточная функция с большей степенью точности близка к звену первого порядка, следовательно, принятая линеаризованная модель объекта управления (11) корректно описывает экспериментальную установку. В результате эксперимента у объекта не было обнаружено запаздывания (оно практически равнялось нулю), однако дальнейшие эксперименты показали, что в некоторых режимах (при некоторых значениях  $p_c^*$  и  $z_c^*$ ) объект обладает запаздыванием.

На рис. 3 показаны входные и выходные сигналы объекта управления в ходе описанного эксперимента. Также приводится выходной сигнал идентифицированной модели, на вход которой подавался сигнал управления (положение заслонки  $z_c$ ), снятый с установки в ходе эксперимента.

### 3.2. Частотная адаптация регулятора

Ставилась задача построить регулятор, обеспечивающий требуемое качество управления (устойчивость системы, отсутствие перерегулирования и колебательности) для разных уставок по давлению перед заслонкой (для разных режимов). Эксперименты на установке проводились в разомкнутом контуре, т. е. ПИД-регулятор был отключен, и заслонка управлялась вручную. Выбиралось некоторое положение заслонки  $z_c^*$ , и затем к нему добавлялся испытательный сигнал вида  $v(t) = 3,3\sin(0,05t) + 6,6\sin(0,1t)$ , %.

В ходе экспериментов входные и выходные сигналы объекта записывались в файл протокола



эксперимента, и затем проводились повторные расчеты по тем же алгоритмам, что при эксперименте в реальном времени, но в среде Matlab. Результаты в обоих случаях получились близкими, различия в них объясняются разными частотами квантования. Контроллер «Emerson» работал с частотой  $h = 2$  Гц, а запись в файл протокола сигналов  $p_c(t)$  и  $z_c(t)$  осуществлялась с частотой  $h = 1$  Гц. В таблице показаны результаты идентификации для двух положений заслонки.

По результатам экспериментов виден сильный разброс параметров в зависимости от выбранного положения заслонки, особенно коэффициента усиления объекта. Также проводились эксперименты с ограничениями на скорость перемещения заслонки ( $\dot{z}_c(t) \leq D$ , где  $D$  — задается разработчиками установки). Результаты этих экспериментов совпадают с результатами идентификации в таблице, из чего был сделан вывод о том, что используемые ограничения на скорость изменения управления не оказывают влияния на процесс идентификации.

По результатам идентификации, полученным при эксперименте с заслонкой в положении 40 % (передаточная функция объекта  $w(s) = \frac{45,4}{8,06s + 1} e^{-2,54s}$ ) был рассчитан ПИД-регулятор с параметром быстродействия  $\lambda = 7$ :  $k_c = 0,021$ ;  $g = 0,928$ ;  $T_i = 432,25$ ;  $T_d = 0,029$ .

Эксперименты с этим регулятором показали, что он обеспечивает устойчивость системы, но при переходных процессах возникает перерегулирование (рис. 4), что означает слишком высокий коэффициент усиления регулятора.

С найденным регулятором на установке проводились эксперименты по идентификации объекта в замкнутом контуре. Испытательный сигнал был вида:  $v(t) = 16,67\sin(0,05t) + 33,33\sin(0,1t)$ , кПа. На рис. 4 показаны графики входных и выходных сигналов объекта управления в этом эксперименте. Для наглядности давление показано в единицах psi.

**Результаты экспериментов**

Положение заслонки $z_c^*$ , %	Результаты экспериментов на технологической установке			Результаты расчета в Matlab по лог-файлам		
	$\hat{k}_p$	$\hat{T}$	$\hat{\tau}$	$\hat{k}_p$	$\hat{T}$	$\hat{\tau}$
40	45,4	8,06	2,54	38,8	6,57	1,45
50	14,8	9,37	—	14,2	8,5	—

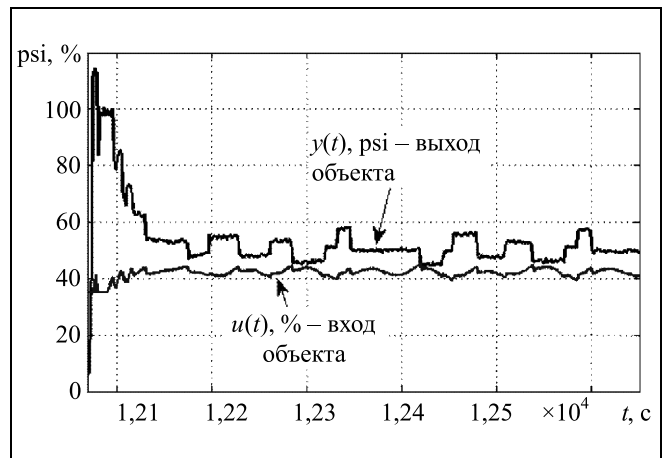


Рис. 4. Результаты эксперимента в замкнутом контуре

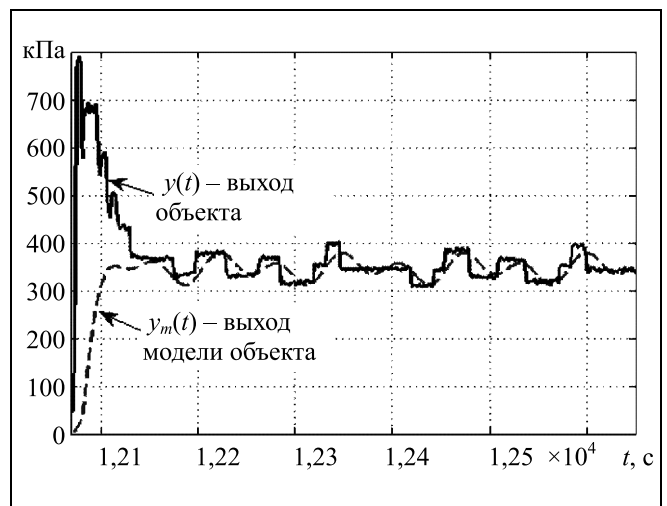


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования в Matlab и реальных данных эксперимента

По графикам видно, что имеется большое перерегулирование по давлению в переходном процессе, а приложенный испытательный сигнал визуально плохо поддается выделению.

Анализ результатов эксперимента в Matlab дал следующие оценки параметров объекта управления:  $\hat{k}_p = 29,93$ ;  $\hat{T} = 13,53$ ;  $\hat{\tau} = 3,06$ . На рис. 5 показаны графики давления, снятые с реального объекта и полученные при моделировании в Matlab замкнутой системы, составленной из ПИД-регулятора с параметрами (13) и идентифицированного объекта с передаточной функцией  $\frac{29,93}{13,53s + 1} e^{-3,06s}$ . Из рис. 5 видно, что после завершения переходного

го процесса выход модели замкнутой системы и выход реальной установки ведут себя похоже, но в течение самого переходного процесса наблюдается значительное расхождение между этими сигналами. Это связано с тем, что в переходном процессе из-за влияния начальных условий значения входа и выхода объекта значительно отклоняются от величин, около которых проводилась идентификация линеаризованной модели, при этом сказываются нелинейности, присущие объекту управления.

В результате описанных экспериментов стало ясно, что параметр быстродействия следует выбирать как  $\lambda = (2 \div 4)T$ . При таком выборе регулятор обеспечивает устойчивость на различных уставках давления, перерегулирование незначительное, а быстродействие системы отвечает заданным требованиям.

Следует учитывать, что исследования проводились на экспериментальной установке. При установке данного оборудования и реализации предложенного алгоритма на реальной буровой скважине, возможно, потребуются дополнительные исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При управлении процессом бурения с контролируемым давлением применено частотное адаптивное управление для уменьшения влияния внешних факторов и адаптации системы управления к дрейфу параметров. Частотная адаптация была реализована с помощью настройщика ПИД-регуляторов, который представляет собой программный модуль, добавленный в систему управления положением заслонки. Настройщик, используя конечно-частотную идентификацию, находит параметры линеаризованной модели процесса бурения, описываемого нелинейными уравнениями, и рассчитывает соответствующие параметры ПИД-регулятора. Корректность использования линеаризованной модели подтверждена в ходе испытаний. Результаты экспериментальных исследований на реальной технологической установке подтвердили эффективность использования частотной адаптации, однако в условиях реального процесса бурения могут потребоваться дополнительные исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. — 632 с.

2. Starnes III N., Zhou J., Kaasa G.-O., Aamo O.M. Adaptive Observer Design for the Bottomhole Pressure of a Managed Pressure Drilling System // Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control. — Cancun, Mexico, 2008. — P. 2961—2966.
3. Godhavn J.-M., Pavlov A., Kaasa G.-O., Rolland N.L. Drilling seeking automatic control solutions // Preprints of the 18th IFAC World Congress. — Milano, Italy, 2011. — P. 10842—10850.
4. Mahdianfar H., Pavlov A., Aamo O.M. Joint Unscented Kalman Filter for State and Parameter Estimation in Managed Pressure Drilling // European Control Conference (ECC). — Zürich, Switzerland, 2013. — P. 1645—1650.
5. Nygaard G. Нэвдал G. Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling // Journal of Process Control. — 2006. — Vol. 16. — P. 719—732.
6. Li Z., Hovakimyan N., Kaasa G.-O. Bottomhole Pressure Estimation and  $L_1$  Adaptive Control in Managed Pressure Drilling System // Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production. — Trondheim, Norwegian, 2012. — P. 128—133.
7. Zhou J., Nygaard G. Automatic model-based control scheme for stabilizing pressure during dual-gradient drilling // Journal of Process Control. — 2011. — Vol. 21. — P. 1138—1147.
8. Александров А.Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием // Тр. IX междунар. Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением». Т. 3, Управление и оптимизация. — Иркутск, 2007. — С. 6—13.
9. Александров А.Г., Паленов М.В. Самонастраивающийся ПИД/И регулятор // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 10. — С. 4—18.
10. Александров А.Г., Шатов Д.В. Настройщик для ПИД-регулятора и его реализация // Тр. 13-й междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2013) / Под ред. А.В. Толока. — М., 2013. — С. 65—68.
11. Александров А.Г., Шатов Д.В. Автономный универсальный настройщик ПИД-регуляторов / Управление большими системами (УБС'2014) [Электронный ресурс]: Материалы XI Всерос. школы-конф. молодых ученых, 9—12 сент. 2014 г., Арзамас. — М.: ИПУ РАН, 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — С. 898—904.
12. Visioli A. Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID-controllers // Proceedings of 15th Triennial World Congress. — Barcelona, Spain, 2002. — P. 666—671.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

**Александров Вадим Альбертович** — канд. техн. наук, ген. директор, ООО «Адаплаб», г. Москва, ✉ v.alexandrov@adaplab.ru,

**Паленов Максим Владимирович** — канд. техн. наук, техн. специалист, ООО «Адаплаб», г. Москва, ✉ palenov.maxim@gmail.com,

**Шатов Дмитрий Владимирович** — мл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ dvshatov@gmail.com.