

УДК 519.688:552.578.2.061.4

А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев, А.С. Анников

## Адаптивные динамические системы идентификации и управления в условиях неопределенности

Предлагается технология проектирования адаптивных динамических систем, позволяющая синтезировать широкий спектр новых алгоритмов идентификации и управления в условиях неопределенности. Приводится пример проектирования алгоритмов адаптивной идентификации для гидродинамических исследований скважин нефтяных месторождений.

**Ключевые слова:** идентификация, управление, адаптация, интегрированные динамические системы, априорная информация, гидродинамические исследования скважин, нефтяные месторождения.

Рассматривается развитие технологии проектирования адаптивных интегрированных систем идентификации и управления с использованием метода интегрированных моделей объекта управления и моделей объектов аналогов, предложенной в [1, 2]. В условиях неопределенности (недостаточности и недостоверности исходных данных и дополнительных априорных сведений, многокритериальности задач, нестабильности внешней среды и т.п.) многие классические и современные методы идентификации и управления не способны достигать требуемого уровня качества. Поскольку отмеченные условия неопределенности характерны для многих научно-технических задач, актуальным является развитие новых методов и алгоритмов обработки информации, идентификации, управления обладающих элементами самоорганизации.

Основой адаптивных динамических систем идентификации и управления, являются открытые динамические интегрированные системы моделей вида:

$$\begin{cases} Y_t^* = F_0(t, Y_{t-\tau}^*, X_t^*, U_t^*, \xi_t), \\ \bar{V}_{jt} = \bar{F}_j(t, \bar{V}_{j(t-k)}, Z_{jt}, \eta_{jt}), j = \overline{1, m}; t, \tau, k = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

где  $Y_t^*, Y_{t-\tau}^*, X_t^*, U_t^*$  – реализации выходных  $Y$  и входных  $U, X$  управляемых и неуправляемых переменных объекта управления;  $\bar{V}_{jt}, \bar{V}_{j(t-k)}$  – реализации выходных переменных моделей объектов аналогов, представляющих дополнительные априорные данные, экспертные оценки факторов внешней среды, их прогнозные значения и т.д.;  $F, \bar{F}_j$  – динамические модели исследуемого объекта и объекта аналога (в общем случае операторы), объединяющие модели состояния объекта управления, начальные и граничные условия, а также модели измерений;  $\xi_t, \eta_t$  – случайные процессы, представляющие погрешности исходных данных, ошибки дополнительных априорных сведений. Переменные  $Z_j$  объектов аналогов могут соответствовать переменным объекта управления, а также представлять параметры, функции (функционалы).

Проектирование адаптивных динамических систем идентификации и управления в условиях неопределенности с позиций системного подхода можно представить как процесс выбора оптимальной системы альтернатив, заключающейся в формировании исходных данных, дополнительных априорных сведений, экспертных оценок, динамической системы моделей вида (1), ее векторного показателя качества, и решении оптимизационных задач. Так, например, при параметрическом представлении объекта управления  $Y_t^* = f_0(t, \alpha, Y_{t-\tau}^*, X_t^*, U_t^*, \xi_t)$  и моделей объектов аналогов  $\bar{V}_{jt} = \bar{f}_j(t, \beta, \bar{V}_{j(t-k)}, Z_{jt}, \eta_{jt})$ , с точностью до неизвестных параметров  $\alpha, \beta$ , процедура выбора оптимальной системы альтернатив  $Z_t(m) = \{\alpha, U_t, f_0, (\bar{f} = \bar{f}_j, j = \overline{1, m}), \beta\}$  сводится к решению оптимизационных задач управления с идентификацией:

$$\begin{cases} \alpha_t^*(\mathbf{h}_t, \beta_t), f_0^*, \bar{\mathbf{f}}^* = \arg \min_{\alpha_t, f_0, \bar{\mathbf{f}}} \Phi_1(\alpha_t, f_0, \bar{\mathbf{f}}, \mathbf{h}_t, \beta_t), \mathbf{h}_t^*, \beta_t^* = \arg \min_{\alpha_t, \beta_t} J_0(\alpha_t^*, f_0^*, \bar{\mathbf{f}}^*, \mathbf{h}_t, \beta_t), \\ U_t^* = \arg \min_{U_t} \Phi_2(U_t, \alpha_t^*, f_0^*, \bar{\mathbf{f}}^*, \mathbf{h}_t^*, \beta_t^*). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь запись  $\operatorname{argmin}_x f(x)$  означает решение задачи определения минимума  $x^*$  функции  $f(x)$  ( $f(x^*) = \min_x f(x)$ );  $Z_t^*(m) = (\alpha_t^*, U_t^*, f_0^*, \bar{f}^*, \mathbf{h}_t^*, \beta_t^*)$  – наилучшая система альтернатив сложности  $m$ ;  $\Phi_1, \Phi_2$  – эмпирические функционалы качества, состоящие из показателя качества модели объекта управления  $J_0$  и показателей качества моделей объекта аналогов  $\bar{J}_k, k = \overline{1, m}$ ;  $\mathbf{h}_t = (h_{1t}, h_{2t}, \dots, h_{mt})$  – вектор управляющих параметров, определяющих значимость (вес) дополнительных априорных данных  $\bar{V}_{jt}, \bar{V}_{j(t-k)}, j = \overline{1, m}$ .

Приведенная оптимальная система альтернатив (2), за счет усложнения системы (1), увеличения числа объектов аналогов  $m$ , обладает элементами самоорганизации и, следовательно, позволяет повысить качества систем идентификации и управления. При этом обеспечивается решение актуальных задач:

- создание эффективных процедур учета и корректировки неточно заданной разнородной дополнительной априорной информации;
- обеспечение устойчивости решения;
- повышение точности алгоритмов при малом объеме исходных данных;
- формализация и учет накопленного опыта и знаний;
- оптимизация решений прикладных задач.

Предлагаемая технология интеграции информации в рамках системы моделей (1) и оптимизации решений вида (2), по аналогии с [3, 4], позволяет синтезировать широкий спектр адаптивных динамических алгоритмов идентификации и управления в условиях неопределенности с элементами самоорганизации для линейных, нелинейных и непараметрических динамических объектов управления.

Технологию проектирования адаптивных динамических систем идентификации и управления рассмотрим на примере решения задачи адаптивной идентификации и интерпретации гидродинамических исследований скважин (ГДИС) нефтяных месторождений [2, 5, 6]. Отметим, что проблемы многих классических методов идентификации и интерпретации ГДИС (метод касательных, наилучшего совмещения, детерминированных моментов и т.д.) заключаются в том, что они не гарантируют устойчивость оценок параметров залежей и допустимую точность решений в условиях малых выборок, когда по ряду технических причин, в том числе и в целях сокращения времени простоя скважины, требуется прервать исследования. Другая особенность классического подхода связана с планированием исследований и проведением интерпретации результатов ГДИС после их завершения, что часто приводит к длительным простоям скважин и значительным затратам [5, 6].

Для решения указанных проблем предлагается использовать технологию адаптивных динамических систем, которая заключается в формировании по аналогии с (1) динамической системы моделей забойного давления скважины с учетом априорной информации, ее квадратичных показателей качества и решении оптимизационных задач вида (2).

На рис. 1 приведены оценки пластового давления однородно пористого нефтяного пласта при идентификации и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважины Самотлорского месторождения на неустановившихся режимах фильтрации по кривой восстановления забойного давления (КВД) – (линия 1).

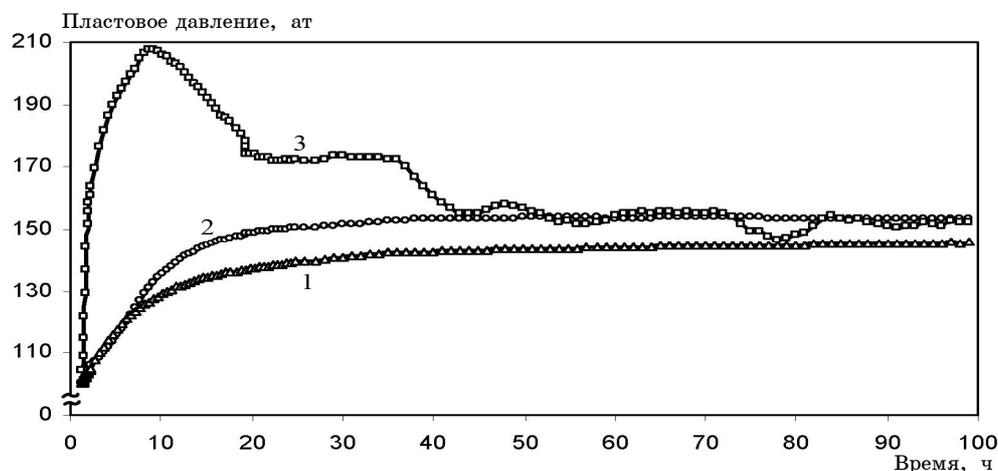


Рис. 1. Оценки пластового давления: КВД – линия 1; по методу адаптивной идентификации – линия 2; по традиционному методу наилучшего совмещения – линия 3

Из рисунка видно, что технология адаптивной идентификации и интерпретации ГДИС дает возможность получать стабильные оценки пластового давления на коротких недовосстановленных КВД порядка 20–30 ч, что позволяет значительно сократить протой скважин и увеличить добычу нефти.

Для решения задачи адаптивной идентификации и интерпретации ГДИС использовались:

1. Динамическая система моделей КВД для однородного пористого нефтяного пласта вида

$$\begin{cases} P_t^* = f(P_{t-1}, t, \alpha_t) + \xi_t = P_{t-1} + \Delta t \cdot (q_0 + C \cdot P_{t,y}^*) \exp(-\frac{r_c^2}{4\alpha_{2t}}) / (4\pi\alpha_{2t}) + C + \xi_t, t=1,2,3,\dots, \\ \bar{\alpha}_{jt} = \bar{\alpha}_{j,(t-1)} + \beta_j \cdot (\alpha_{jt} - \bar{\alpha}_{j,(t-1)}) + \eta_{jt}, \bar{P}_{пл,t} = \bar{P}_{пл,(t-1)} + \beta_3 \cdot (f(P_{t-1}, T, \alpha) - \bar{P}_{пл,(t-1)}) + v_t, j=1,2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $P_t^*, P_{t,y}^*$  – измеренные значения забойного и устьевого давлений;  $P_t$  – значения забойного давления, вычисленные на основе модели КВД  $f(P_{t-1}, t, \alpha)$  [6];  $\bar{\alpha}_t = (\bar{\alpha}_{1t}, \bar{\alpha}_{2t})$  – скорректированные значения экспертных оценок пьезопроводности и гидропроводности призабойной зоны нефтяной залежи;  $\bar{P}_{пл,t}$  – скорректированные значения экспертных оценок пластового давления;  $T=100$  ч – время восстановления забойного давления до пластового;  $C, r_c^2$  – константы;  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$  – параметры сглаживания;  $\xi_t, \eta_t, v_t$  – случайные составляющие моделей КВД и априорных сведений.

2. Комбинированный показатель качества модели (3) вида

$$\Phi = J_0 + h_1 \bar{J}_1 + h_2 \bar{J}_2 + h_3 \bar{J}_3, \quad (4)$$

состоящий из частных квадратичных показателей качества  $J_0, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{J}_3$ , модели КВД и моделей экспертных оценок, где  $h_1, h_2, h_3$  – управляющие параметры, определяющие значимость (вес) экспертных оценок.

Оценки пластового давления, приведенные на рисунке, при  $\beta_j = \beta, h_j = h, j=1,3$  рассчитывались по формуле

$$P_{пл,t}^*(h^*) = f(P_{t-1}, T, \alpha_t^*(\beta^*, h^*)), \quad (5)$$

где  $\alpha_t^*(\beta^*, h^*) = (\alpha_{1t}^*(\beta^*, h^*), \alpha_{2t}^*(\beta^*, h^*))$  – оценки параметров модели КВД, параметра сглаживания и управляющего параметра  $\beta^*, h^*$ , полученные путем решения оптимизационных задач вида (2) с использованием методов оптимизации Гаусса–Ньютона и деформированного многогранника при  $T=100$  ч [7].

Следует отметить, что при значении управляющего параметра  $h^* = 0$  оценки пластового давления (5) совпадают с традиционными оценками метода наилучшего совмещения  $P_{пл,t}^*(0)$  [5, 6], а их новым свойством, в отличие от рассмотренных в [2], является наличие механизма обучения экспертов, а именно, корректировки в процессе идентификации неточно заданных экспертных оценок фильтрационных параметров нефтяных пластов  $\alpha_0 = (\alpha_{10}, \alpha_{20})$  и пластового давления  $\bar{P}_{пл,0}$ .

В заключение отметим, что приведенная технология проектирования адаптивных динамических систем идентификации и управления в условиях неопределенности отражает целостные, системные свойства реальных объектов, обладает элементами самоорганизации, что позволяет повысить уровень качества и является перспективным направлением развития автоматизированных систем обработки информации и динамических интеллектуальных систем.

#### Литература

1. Адаптивные интегрированные системы идентификации и управления. Вопросы проектирования и развития / А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев // Электронные средства и системы управления: докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. – Ч. 2. – С. 58–61.

2. Интегрированные системы идентификации для мониторинга разработки нефтяных месторождений / А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 1(19), ч. 1. – С. 116–125.

3. Сергейев В.Л. Интегрированные системы идентификации: учеб. пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 238 с.
4. Сергейев В.Л. Идентификация систем с учетом априорной информации. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 146 с.
5. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
6. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.
7. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

---

**Кори́ков Анатолий Михайлович**

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

**Сергеев Виктор Леонидович**

Д-р техн. наук, проф. каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: SVL@mail.tomsknet.ru

**Севос́тьянов Дмитрий Владимирович**

Канд. техн. наук, менеджер проекта ООО «Оригма», г. Томск  
Эл. почта: Sevostjanov@aurigma.com

**Сергеев Павел Викторович**

Канд. техн. наук, менеджер проекта ООО «АКСИС-МЕДИА», г. Томск  
Эл. почта: SVL@mail.tomsknet.ru

**Аниканов Александр Сергеевич**

Аспирант каф. геологии и разработки нефтяных месторождений  
Института природных ресурсов НИТПУ, г. Томск  
Эл. почта: AnikanovAS@siamoil.ru

Korikov A.M., Sergeev V.L., Sevostyanov D.V., Sergeev P.V., Anikanov A.S.

**Adaptive dynamic systems for identification and control under uncertainty**

A technology for development of adaptive dynamic identification systems, which allows to create a wide range of algorithms for identification and control under uncertainty, is presented. An example of adaptive identification algorithms development for hydrodynamic investigations of oil deposits wells is considered.

**Keywords:** identification, control, adaptation, integrated dynamic systems, a priori data, hydrodynamic investigations of wells, oil deposits.