УДК 519.688:622.279.23

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.Г. Наймушин, В.Л. Сергеев

Томский политехнический университет
E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru

Рассматриваются проблемы параметрической идентификации эволюционных процессов, для решения которых предлагается использовать интегрированные системы феноменологических моделей с учетом априорной информации. Приводятся примеры решения задачи идентификации и прогноза жизненного цикла накопленной продукции в процессе разработки нефтяного месторождения.

Ключевые слова:
Идентификация, феноменологические модели, процессы эволюции, жизненный цикл, априорная информация, нефтяное месторождение, извлекаемые запасы.

Key words:
Identification, phenomenological models, processes of evolution, life cycle, a-priori information, oil deposit, recoverable reserves.

Введение

В настоящее время в связи с возрастающей ролью системного подхода при проектировании и управлении в условиях неопределенности актуальным является решение задач идентификации и прогноза эволюционных процессов жизненного цикла сложных технических и социально-экономических систем. Именно проблема идентификации занимает исключительно важную роль, поскольку является наиболее «узким местом» при проектировании наукоемких и интеллектуальных систем управления и принятия решений [1, 2].

Для прогнозирования жизненного цикла большое внимание уделяется феноменологическим моделям

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, \boldsymbol{\alpha}) \qquad (1)$$

эволюционных процессов

$$y_t^* = y_t + \xi_t = y(t_0) + \int_{t_0}^{t} f(\tau, y, \boldsymbol{\alpha})d\tau + \xi_t, \; t = \overline{1,n}, \qquad (2)$$

отражающих их целостные системные свойства. Здесь y_t^*, y_t, $t=\overline{1,n}$ – фактические и вычисленные на основе модели значения процесса в различные моменты времени t; $f(t,y,\boldsymbol{\alpha})$ – известные с точностью до вектора параметров $\boldsymbol{\alpha}=(\alpha_j, j=\overline{1,m})$ функции; ξ_t, $t=\overline{1,n}$ – различного рода случайные факторы, представляющие погрешности расчета траектории процесса, ошибки измерения y_t, неточности при выборе модели процесса и т. д.

Следует отметить, что наряду с описанием эволюционного процесса в пространстве «вход–выход» (2) известна и другая форма представления феноменологических моделей эволюционных процессов в пространстве состояний, заданная двумя системами моделей, в принципе, сводимая к одной системе [2].

Примерами эволюционных моделей (1), (2) являются текущая емкость рынка инновационного товара, накопленная добыча нефти и газа в процессе разработки месторождений углеводородов, забойные давления при гидродинамических исследованиях скважин на неустановившихся режимах фильтрации [3–5].

Однако при решении задачи параметрической идентификации, связанной с определением параметров феноменологической модели жизненного цикла (2), возникают проблемы обеспечения устойчивости, повышения точности оценок, учета дополнительной априорной информации, особенно на начальной стадии развития процесса, когда объем исходных данных n мал.

В данной работе для решения отмеченных выше проблем идентификации эволюционных процессов предлагается использовать интегрированные системы феноменологических моделей с учетом дополнительной априорной информации.

Модели и алгоритмы идентификации эволюционных процессов

Основой задачи идентификации эволюционных процессов жизненного цикла является интегрированная система феноменологических моделей вида

$$\begin{cases} y_t^* = f_0(t, y, \boldsymbol{\alpha}) + \xi_t, \; t = \overline{1,n}, \\ \bar{x}_j = f_{aj}(y_t, \boldsymbol{\alpha}) + \eta_j, \; j = \overline{1,d}, \end{cases} \qquad (3)$$

где первая система из n уравнений – стохастическая модель исследуемого эволюционного процесса жизненного цикла (2), а вторая система из d уравнений представляет модели объектов аналогов, позволяющих учитывать дополнительную априорную информацию $\bar{x}_j$, известную к моменту времени t. В качестве априорной информации могут быть использованы данные о параметрах эволюционного процесса $\bar{x}_j=\bar{\alpha}_j$, $j=\overline{1,m}$, известные к моменту времени t с погрешностью η_j, будущие значения траектории эволюционного процесса $\bar{x}_{(n+j)}=\bar{y}_{n+j}$, $j=\overline{1,l}$, в том числе и его предельные значения (аттракторы $\bar{x}_\infty=y_\infty$). Модели объектов аналогов $f_{aj}(y_t,\boldsymbol{\alpha})$ могут представлять функции, функционалы, а в общем виде операторы f_{aj} от переменных y_t в классах линейных, нелинейных параметрических либо непараметрических моделей [1]; ξ_t, η_j – случайные неконтролируемые факторы.

Рассмотрим примеры интегрированных систем феноменологических моделей с учетом априорной информации. При использовании априорной информации о параметрах моделей эволюционного процесса $\overline{\alpha}_t$, полученных к моменту времени t, систему моделей (3) можно представить в виде

$$\begin{cases} y_t^* = f(t, y_t, \boldsymbol{\alpha}) + \xi_t,\ t = \overline{1,n}, \\ \overline{\boldsymbol{\alpha}}_t = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\eta}. \end{cases} \tag{4}$$

В случае логистической модели роста [3] и априорных сведений о ее аттракторе $\overline{x}_\infty$ модель (4) принимает достаточно простой вид

$$\begin{cases} y_t^* = y(t_0) + \int\limits_{t_0}^{t} (\alpha_1 y_\tau - \alpha_2 y_\tau^2) d\tau + \xi_t,\ t = \overline{1,n}, \\ \overline{x_\infty} = \alpha_1 / \alpha_2 + \eta. \end{cases} \tag{5}$$

При использовании априорной информации о параметрах феноменологической модели $\overline{\boldsymbol{\alpha}}$ и экспертных оценок будущих значений эволюционного процесса $\overline{y}_{n+j}$ система моделей (3) принимает вид

$$\begin{cases} y_t^* = f_o(t, y_t, \boldsymbol{\alpha}) + \xi_t,\ t = \overline{1,n}, \\ \overline{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\eta},\ \overline{y}_{n+j} = f(y_{n+j}, \boldsymbol{\alpha}) + \nu_j,\ j = \overline{1,l}. \end{cases} \tag{6}$$

Следует отметить, что уравнения вида (3)–(6) представляют простейшую интегрированную систему моделей первого уровня. По аналогии с [1] имеют место и многоуровневые иерархические интегрированные системы феноменологических моделей.

С позиции системного подхода процесс параметрической идентификации эволюционных моделей (3) можно представить как решение оптимизационных задач вида [1]

$$\boldsymbol{\alpha}_n^*(\boldsymbol{\beta}) = \arg\min_{\alpha} \Phi(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}), \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\beta}_n^* = \arg\min_{\beta} J_0(\boldsymbol{\alpha}_n^*(\boldsymbol{\beta})), \tag{8}$$

где запись $\arg\min_x f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)(f(x^*) = \min_x f(x))$; $\Phi(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta}) = \Phi(J_0(\boldsymbol{\alpha}), \beta_k J_k(\boldsymbol{\alpha}_n), k = \overline{1,l})$ – комбинированный показатель качества системы моделей (3), представляющий заданную функцию (функционал) Φ от частного показателя качества $J_0(\boldsymbol{\alpha}_n)$ модели эволюционного процесса жизненного цикла и взвешенных весами $\boldsymbol{\beta}_n$ частных показателей качества $J_k(\boldsymbol{\alpha}_n)$ моделей дополнительных априорных данных и экспертных оценок.

Следует отметить, что рассматриваемая технология выбора оптимальных решений (7), (8) позволяет синтезировать достаточно широкий спектр известных и новых алгоритмов идентификации для линейных и нелинейных интегрированных систем моделей эволюционных процессов (3), а также для различных показателей качества и методов решения оптимизационных задач. Например, для линейной по параметрам $\boldsymbol{\alpha}$ интегрированной системы моделей эволюционных процессов жизненного цикла

$$\begin{cases} \mathbf{y}^* = F_0 \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\xi}, \\ \overline{\mathbf{x}} = F_a \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\eta} \end{cases} \tag{9}$$

и комбинированного показателя качества Φ, выбранного в виде суммы взвешенных частных квадратичных показателей качества

$$\Phi(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = \left\| \mathbf{y}^* - F_0 \boldsymbol{\alpha} \right\|_W^2 + \left\| \overline{\mathbf{x}} - F_a \boldsymbol{\alpha} \right\|_{W(\beta)}^2, \tag{10}$$

оптимизационная задача (7) сводится к решению систем линейных уравнений вида

$$(F_0^T W F_0 + F_a^T W(\boldsymbol{\beta}) F_a) \boldsymbol{\alpha}^*(\boldsymbol{\beta}) = = (F_0^T W \mathbf{y}^* + F_a^T W(\boldsymbol{\beta}) \overline{\mathbf{x}}), \tag{11}$$

где запись $\|X\|_W^2$ означает квадратичную форму $X^T W X^T$; $\mathbf{y}^* = (y_t^*, t = \overline{1,n})$ – вектор фактических значений эволюционного процесса; $\overline{\mathbf{x}} = (\overline{x}_j, j = \overline{1,\mathbf{d}})$ – вектор дополнительных априорных сведений и экспертных оценок; $F_0 = (\varphi_j(t_{i-1}, y_t), j = \overline{1,m}, t = \overline{1,n})$ – матрица известных функций $\varphi_j(t_{i-1}, y_t)$ в модели исследуемого объекта размерности $(m \times n)$; $F_a = (\varphi_{aj}(y_t), j = \overline{1,d}, k = \overline{1,m})$ – матрица известных функций $\varphi_{aj}(y_t)$ в модели объектов аналогов размерности $(d \times m)$; $W(\boldsymbol{\beta}) = \mathrm{diag}\,(\beta_k, k = \overline{1,m})$ – диагональная матрица весовых функций, определяющих значимость (вес) априорных данных $\overline{\mathbf{x}}$; W – известная матрица вероятностно-статистических характеристик случайных величин ξ_t, $t = \overline{1,n}$. Для получения системы линейных уравнений (11) достаточно взять частные производные по параметрам $\boldsymbol{\alpha}$ от комбинированного функционала (10) и приравнять их к нулю.

Для нелинейной интегрированной системы моделей эволюционных процессов жизненного цикла вида

$$\begin{cases} \mathbf{y}^* = \mathbf{f}_0(\boldsymbol{\alpha}) + \boldsymbol{\xi}, \\ \overline{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_a(\boldsymbol{\alpha}) + \boldsymbol{\eta}, \end{cases} \tag{12}$$

и комбинированного показателя качества Φ

$$\Phi(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = \left\| \mathbf{y}^* - \mathbf{f}_0(\boldsymbol{\alpha}) \right\|_W^2 + \left\| \overline{\mathbf{x}} - \mathbf{f}_a(\boldsymbol{\alpha}) \right\|_{W(\beta)}^2$$

оптимизационная задача (7) при использовании метода Гаусса–Ньютона [6] сводится к последовательному решению систем линейных уравнений вида

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_i^* = \boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* + h_i \Delta \boldsymbol{\alpha}_{i-1}^*,\ i = 1, 2, 3, ..., \\ (D_0^T W D_0 + D_a^T W(\boldsymbol{\beta}) D_a)_{i-1} \Delta \boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* = \\ = (D_0^T W \mathbf{e}_0 + D_a^T W(\boldsymbol{\beta}) \overline{\mathbf{e}}_a)_{i-1}, \end{cases} \tag{13}$$

где

$$D_0 = \left(\frac{\partial f_o(t_i, y_i, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \alpha_j},\ i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m} \right)_{nm},$$

$$D_a = \left(\frac{\partial f_{a,k}(t, y, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \alpha_j}, k = \overline{1,l}, j = \overline{1,m} \right)_{lm}$$

– матрицы частных производных от моделей исследуемого процесса и моделей объектов аналогов; $\mathbf{e}_0=(\mathbf{y}^*-\mathbf{f}_0(\boldsymbol{\alpha}))$, $\bar{\mathbf{e}}_a=(\bar{\mathbf{x}}-\mathbf{f}_a(\boldsymbol{\alpha}))$ – векторы невязок, h_i – параметр шага.

Отметим, что приведенные выше оценки параметров интегрированных систем феноменологических моделей (9), (12) при определенных значениях управляющих параметров и дополнительных априорных сведений соответствуют многим традиционным методам идентификации. Например, из (11) при нулевых значениях априорных данных $\bar{x}_j=0, j=\overline{1,d}$ и $F_a=W=I$, $\beta_k=\beta$, $k=\overline{1,m}$ (где I – единичная матрица) следуют известные Ridge-приближения и регуляризирующие по Тихонову оценки параметров линейных регрессионных моделей [6]

$$\boldsymbol{\alpha}^* = (F_0^T F_0 + I\beta)^{-1} F_0^T \mathbf{y}^*, \quad (14)$$

позволяющие получать устойчивые решения при вырожденности либо плохой обусловленности матрицы $F_0^T F_0$. Следует отметить, что оценки (14) являются оптимальными приближениями параметров, доставляющих минимум стабилизирующего функционала А.Н. Тихонова [7]

$$\Phi(\boldsymbol{\alpha},\beta) = \left\|\mathbf{y}^* - F_0\boldsymbol{\alpha}\right\|_W^2 + \beta\left\|\boldsymbol{\alpha}\right\|^2,$$

следующего из комбинированного показателя качества (10).

При аналогичных условиях оценки параметров (13) для нелинейных моделей совпадают с устойчивыми оценками метода Левенберга–Марквардта [6]

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_i^* = \boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* + h_i \Delta\boldsymbol{\alpha}_{i-1}^*, \quad i = 1,2,3,..., \\ (D_0^T D_0 + I\beta)_{i-1} \Delta\boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* = (D_0^T \mathbf{e}_0 + W(\boldsymbol{\beta})\bar{\mathbf{e}}_a)_{i-1}, \end{cases} \quad (15)$$

а при $\beta=0$ – с методом Гаусса–Ньютона

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_i^* = \boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* + h_i \Delta\boldsymbol{\alpha}_{i-1}^*, \quad i = 1,2,3,..., \\ (D_0^T D_0)_{i-1} \Delta\boldsymbol{\alpha}_{i-1}^* = (D_0^T \mathbf{e}_0)_{i-1}. \end{cases} \quad (16)$$

Следует также отметить, что задача (8) по определению оптимальных значений вектора управляющих параметров $\boldsymbol{\beta}_n^*$ не имеет аналитического решения и решается методами последовательных приближений.

Идентификация эволюционного процесса накопленной добычи нефти

На рис. 1–3 и в таблице приведены результаты решения актуальной задачи анализа и контроля разработки лицензионных участков нефтяных месторождений, прогноза накопленной добычи нефти и оценки извлекаемых запасов.

Для решения задачи интеграции геологической и технологической информации и идентификации эволюционного процесса использовалась интегрированная система моделей накопленной добычи нефти вида

$$\begin{cases} y_t^* = f(t,\boldsymbol{\alpha}) + \xi_t = \\ = y(t_0) + \alpha_1 \int\limits_{t_0}^{t} \exp(-\alpha_2\tau)\tau^{\alpha_3} d\tau + \xi_t, \ t = \overline{1,n}, \\ \bar{z}_\infty = \bar{\kappa}Q + \eta = f(\infty,\boldsymbol{\alpha}) + \eta, \end{cases} \quad (17)$$

где y_t^*, $t=\overline{1,n}$ – фактические значения добычи нефти объектов разработки за период времени Δt; $y(t_0)$ – накопленная к начальному моменту времени t_0 добыча нефти; $\bar{z}_\infty$ – априорная информация об извлекаемых запасах; Q – геологическая оценка балансовых запасов; $\bar{\kappa}$ – экспертная оценка коэффициента извлечения.

Фактические значения накопленной добычи нефти пласта $Ю_2^1$ нефтяного месторождения Томской области за 23 года разработки приведены на рис. 1–3 сплошной линией 1. Линии 2–5 представляют оценки прогнозной добычи нефти $\hat{y}(t_n+\tau)$, начиная со второго года разработки

$$\hat{y}(t_n+\tau) = f(t_n+\tau, \alpha_n^*(\beta_n^*)),$$
$$t_n = n, n = \overline{1,5}, \tau = \overline{1,23-n}, \quad (18)$$

где $\boldsymbol{\alpha}_n^*(\beta_n^*)$ – оценки параметров модели (17), полученные на основе (13) при соответствующих значениях матриц частных производных от модели годовой добычи нефти, векторов невязок и при оптимальном значении управляющего параметра β_n^* (3), полученного с использованием метода золотого сечения.

Точные значения извлекаемых запасов за все время разработки нефтяного пласта $Ю_2^1$ составили $z_\infty=7{,}4\cdot10^6$ тонн. Априорная информация об извлекаемых запасах выбиралась равной $\bar{z}_\infty=5\cdot10^6$ тонн с ошибкой порядка 30 %.

Корректировка априорной информации $\bar{z}_\infty$ в модели (17) проводилась по схеме

$$\bar{z}_{\infty,n} = f(T, \boldsymbol{\alpha}_n^*(\beta_n^*)), n = 2,3,...,$$

где T соответствует времени завершения разработки нефтяного пласта (T=43).

В таблице приведены значения относительных ошибок оценок извлекаемых запасов за первые 7 лет разработки нефтяного пласта

$$\delta_n = abs((f(T, \boldsymbol{\alpha}_n^*(\beta_n^*)) - z_\infty)/z_\infty), n = \overline{2,7},$$

полученные на основе (13) и условно названные методом интегрированных моделей (МИМ), методом Гаусса–Ньютона (МГН) (16) и методом Левенберга–Марквардта (МЛМ) (15).

Из таблицы видно, что метод интегрированных моделей позволил улучшить экспертную оценку извлекаемых запасов с 30 до 5 % ошибки, что отражено и на графиках рис. 1 (линии 2–4), демонстрирующих достаточно быструю сходимость прогнозных значений накопленной добычи нефти (18) к их фактическим значениям.

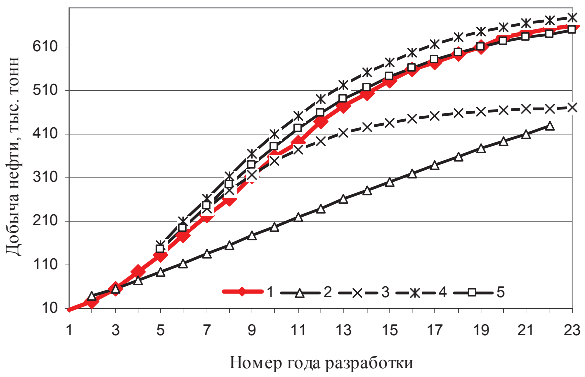

Рис. 1. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2–5) с учетом априорной информации о запасах

Таблица. Относительная ошибка оценок извлекаемых запасов, %

Методы	Длительность разработки (номер года)					
	2	3	4	5	6	7
МИМ	0,461	0,244	0,173	0,086	0, 059	0,046
МГН	–	8,405	6,537	0,369	0,469	0,319
МЛМ	3,483	0,363	0,312	0,343	0,349	0,301

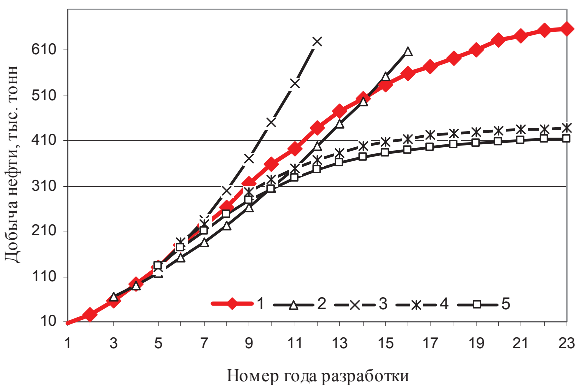

Рис. 2. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2–5) с использованием метода Гаусса–Ньютона

Для сравнения качества прогноза на рис. 2 и 3 приведены прогнозные значения накопленной добычи нефти, полученные с использованием метода Гаусса–Ньютона, начиная с третьего года разработки, и метода Левенберга–Марквардта, – со второго года разработки.

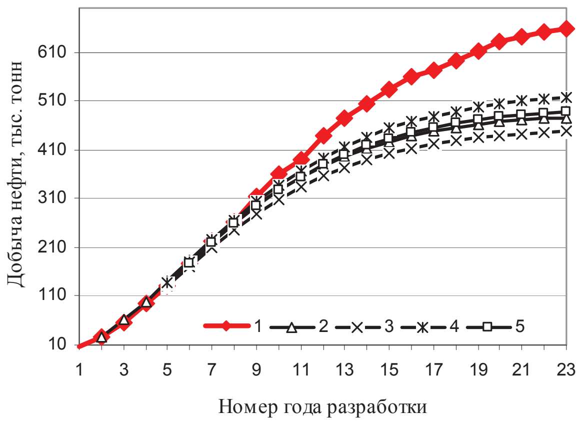

Рис. 3. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2–5) с использованием метода Левенберга–Марквардта

Выводы

1. Для идентификации эволюционных процессов жизненного цикла систем предложено использовать интегрированные системы феноменологических моделей с учетом априорной информации.
2. Приведен метод синтеза и примеры оптимальных, в смысле квадратичных показателей качества, оценок параметров линейных и нелинейных интегрированных систем феноменологических моделей.
3. На примере идентификации эволюционного процесса накопленной добычи нефти показано, что предлагаемые модели и алгоритмы, условно названные методом интегрированных моделей, позволяют при малом объеме промысловых данных получить более точные оценки извлекаемых запасов по сравнению с классическими алгоритмами Гаусса–Ньютона и Левенберга–Марквардта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 198 с.
2. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
3. Кожухова В.Н., Семенычев Е.В. Методы идентификации логистической динамики и жизненного цикла продукта моделью Верхулста // Экономика и математические методы. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 108–115.
4. Кемерова П.А., Сергеев В.Л., Аниканов А.С. Адаптивная идентификация и интерпретация нестационарных гидродинамических исследований с учетом притока продукции в скважине // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 43–46.
5. Хасанов М.М., Карачурин Н.А., Тяжев Е.А. Оценка извлекаемых запасов на основе феноменологических моделей // Вестник инженерного центра ЮКОС. – 2001. – № 2. – С. 3–7.
6. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 300 с.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 392 с.

Поступила 24.12.2012 г.