

УДК 532.546.3, 519.6
ББК 33.361, 73

АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ ДИНАМИКИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ И ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Надеждин О. В.¹

(Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения; ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа)

Заминова А. Р.²

(Уфимский государственный авиационный технический университет; ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа)

Представлен способ идентификации параметров дискретной динамической системы в виде обобщённого настраиваемого объекта измерения (ОНОИ). Производится сравнительный анализ эффективности генетического и переборного алгоритмов для определения значения параметра фильтра состояния. Описано применение данного алгоритма для идентификации параметров системы, описывающей связанность динамики нагнетательных и добывающих скважин месторождения.

Ключевые слова: идентификация динамических систем, метод обобщённого настраиваемого объекта измерения (ОНОИ), генетический алгоритм.

1. Введение

Как известно, запасы нефти многих месторождений на сегодняшний день считаются истощёнными, большое число месторождений относится к категории трудно разрабатываемых.

¹ Надеждин Олег Владимирович, соискатель степени канд. техн. наук (NadezhdinOV@ufanipi.ru).

² Заминова Алина Рифкатовна, аспирант (ZaminovaAR@ufanipi.ru).

Поэтому значительная часть добычи обеспечивается за счет внедрения систем поддержания пластового давления (ППД) путем нагнетания воды. В процессе заводнения происходит увеличение неоднородности распределения фильтрационных потоков в пласте как по площади, так и по глубине, что может привести к преждевременному обводнению одних скважин и запаздыванию выработки других.

Таким образом, при разработке объектов нефтяных месторождений необходимо учитывать информацию о существующих фильтрационных потоках и гидродинамическом взаимодействии скважин.

В связи с этим возникла необходимость в разработке компьютерной системы по обнаружению, оценке и прогнозированию возникающих фильтрационных потоков.

2. Постановка задачи

Необходимо провести анализ связности скважин, заключающийся в количественном определении воздействий нагнетательных скважин на добывающие. Воздействие может быть отражено в коэффициентах влияния для каждой пары скважин «нагнетание – добыча», или выражено в долях жидкости, поступающей от данной нагнетательной скважины к данной добывающей, в общем объеме закачиваемой в нагнетательную скважину воды.

В качестве исходных данных используются исторические дебиты добываемой и закачиваемой жидкости (данные ежемесячных замеров) и координаты скважин. У каждой скважины месторождения фиксируются периоды добычи и (или) нагнетания и определяется время начала и окончания каждого из таких периодов. Если у скважины за рассматриваемый период истории был изменён характер работы (обычно это переключение с добычи на нагнетание), то она рассматривается как две отдельные скважины с различными периодами эксплуатации.

В качестве алгоритма для идентификации полученной динамической системы использовались алгоритмы:

- РЕМ (*prediction error method*) – метод, реализованный в системе Matlab [6],
- ОНОИ (алгоритм на основе обобщённого настраиваемого объекта измерения) [1, 2, 4, 5].

По получаемым с использованием одного из алгоритмов идентификации данным о значениях параметров динамической системы впоследствии вычисляются вклады воздействующих нагнетательных скважин в продукцию каждой добывающей скважины.

3. Идентификация параметров динамической системы скважин

3.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим систему скважин месторождения как динамическую систему, на вход которой подаются дебиты закачки нагнетательных скважин, а на выходе – дебиты жидкости добывающих скважин.

Обозначим дебиты добывающих и закачивающих скважин, попавших в радиус взаимодействия, как

$$(1) \quad Y(t) = \begin{bmatrix} Prod_1(t) \\ Prod_2(t) \\ \dots \\ Prod_r(t) \end{bmatrix}; \quad U(t) = \begin{bmatrix} Inj_1(t) \\ Inj_2(t) \\ \dots \\ Inj_m(t) \end{bmatrix},$$

где r – число добывающих скважин Y , m – число закачивающих скважин U , t – номер замера во времени $t = \overline{1, N}$.

Поскольку существует инерция в процессе взаимодействия скважин между собой, то в качестве модели взаимосвязи добывающих и нагнетательных скважин в первом приближении можно рассмотреть систему дифференциальных уравнений порядка n :

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU, \\ \hat{Y} = CX + DU; X(t_0) = X_{ic}; \end{cases}$$

где $A = \{n, n\}$, $B = \{n, m\}$, $C = \{r, n\}$, $D = \{r, m\}$, а X_{ic} – начальные условия [4].

Зная данные по истории добычи $Y = [Y(t_1), \dots, Y(t_N)]$, $U = [U(t_1), \dots, U(t_N)]$ и задаваясь порядком n системы дифференциальных уравнений (2), находим такие значения параметров матриц A , B , C , D и начальных условий X_{ic} , чтобы была минимальной сумма квадратов ошибок:

$$(3) \quad J = \sum_{t=1}^N \left(Y(t) - \hat{Y}(t) \right)^2,$$

где N – число замеров.

На данном этапе исследований каждая добывающая скважина рассматривалась с группой из m закачивающих по отдельности, т. е. $r = 1$, а

$$(4) \quad Y(t) = [Prod_i(t)]; \quad U(t) = \begin{bmatrix} Inj_1(t) \\ Inj_2(t) \\ \dots \\ Inj_m(t) \end{bmatrix}.$$

Таким образом, для каждой добывающей скважины с дебитом $Prod_i(t)$ и группы закачивающих скважин с дебитами $U(t)$ строилась своя модель (2).

3.2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ОНОИ

Для случая с одним выходом и несколькими входами решение задачи идентификации с использованием алгоритма ОНОИ будет следующим. Рассмотрим объект идентификации, динамика которого описывается матричным дифференциальным уравнением:

$$(5) \begin{cases} \dot{X} = AX + BU, \\ Y = CX + DU; \quad X(t_0) = X_{ic}; \end{cases}$$

где $X = \{n, 1\}$, $U = \{m, 1\}$, $Y = \{1, 1\}$.

Требуется по результатам наблюдений векторов входа и выхода $U(t)$, $Y(t)$ восстановить параметры системы (2) – A , B , C , D и X_{ic} . Переходя к операторному уравнению, заменив операцию дифференцирования на $s = d/dt$, получим уравнение:

$$(6) (a_{10} + a_{11}s + \dots + s^n)y_1 = (b_{101} + b_{111}s + \dots + b_{1n1}s^n)u_1 + \dots + (b_{10m} + b_{11m}s + \dots + b_{1nm}s^n)u_m + (c_{10} + c_{11}s + \dots + c_{1,n-1}s^{n-1})s1(t).$$

Пропустив выражение (6) через линейный фильтр $1/G(s)$, где $G(s)$ – Гурвицев полином вида

$$(7) G(s) = (T_p s + 1)^n,$$

после разложения на простейшие слагаемые получим:

$$(8) \left(1 + \alpha_{11} \frac{1}{T_{\delta s + 1}} + \dots + \alpha_{1n} \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n}\right) y_1 = \left(\beta_{101} + \beta_{111} \frac{1}{T_{\delta s + 1}} + \dots + \beta_{1n1} \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n}\right) u_1 + \dots + \left(\beta_{10m} + \beta_{11m} \frac{1}{T_{\delta s + 1}} + \dots + \beta_{1nm} \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n}\right) u_m + s \left(\gamma_{11} \frac{1}{T_{\delta s + 1}} + \dots + \gamma_{1n} \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n}\right) 1(t).$$

Если обозначить

$$(9)$$

$$z_1 = y_1;$$

$$Y = \left[\frac{1}{T_{\delta s + 1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n} \right]^T y;$$

$$Y_u = \left[\left[\frac{1}{T_{\delta s + 1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n} \right] u_1 \dots \left[\frac{1}{T_{\delta s + 1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s + 1})^n} \right] u_r \left[\frac{s}{T_{\delta s + 1}} \dots \frac{s}{(T_{\delta s + 1})^n} \right] 1 \right]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_n \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{01} & \beta_{11} \dots \beta_{n1} & \dots & \beta_{1m} \dots \beta_{nm} & \gamma_1 & \gamma_2 & \dots & \gamma_n \end{bmatrix}$$

то от уравнения (6) можно перейти к уравнению:

$$(10) z = [A \ B] \cdot \begin{bmatrix} Y \\ Y_u \end{bmatrix}.$$

После транспонирования (10) получим:

$$(11) \begin{bmatrix} Y^T & Y_u^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A^T \\ B^T \end{bmatrix} = z^T,$$

где данные искомого вектора $\begin{bmatrix} A^T \\ B^T \end{bmatrix}$ находятся решением (11) по данным за все моменты времени МНК либо минимизацией квадрата мгновенной ошибки.

3.3. НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА ФИЛЬТРА

Таким образом, использование линейного фильтра позволило свести минимизацию функционала (3) к решению системы уравнений (11). Но в общем случае оптимум, соответствующий минимуму ошибки в выражении (11), строго говоря, не обязан всегда совпадать с оптимумом исходной функции ошибки идентификации (3). В связи с этим, для улучшения качества оценивания параметров системы (2) неявной моделью (8) производится подбор значения фильтра T_p , минимизирующего ошибку идентификации (3).

Ниже будет представлен пример сравнения временной и вычислительной эффективности переборного и генетического алгоритма для поиска значения параметра фильтра T_p .

4. Расчёт воздействий нагнетательных скважин окружения на добывающую скважину

4.1. ВЫБОР АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ФИЛЬТРА

Для анализируемой скважины для различных значений порядков по обучающей выборке данных вычислялись параметры динамической системы методами РЕМ и ОНОИ с настройкой

параметра фильтра генетическим алгоритмом (ГА) [3] и с использованием полного перебора. Алгоритм полного перебора и ГА тестировались на одном и том же диапазоне значений параметра фильтра. По полученным параметрам динамической системы рассчитывались суммарные отклонения действительных и рассчитанных дебитов добычи на обучающей и тестовой выборках. На вход динамической системы подавались данные истории по четырём нагнетательным скважинам, на выходе была получена расчётная динамика добычи одной добывающей скважины, история разработки анализировалась по 178 замерам.

Результаты суммарных отклонений для различных порядков представлены в таблице 1, где t – время выполнения алгоритма в секундах; err – суммарный коэффициент отклонения с экспериментально выбранными весовыми коэффициентами:

$err = p_1w_1 + p_2w_2$; w_1 – суммарное отклонение на обучающей выборке, w_2 – суммарное отклонение на тестовой выборке данных; веса были взяты равными $p_1 = 1$ и $p_2 = 1$.

Таблица 1. Суммарные отклонения для различных алгоритмов

Порядок системы	РЕМ		ОНОИ с перебором		ОНОИ с ГА	
	err	t	err	t	err	t
1	428	0,41	1596	6,21	806	1,61
2	503	0,46	250	5,72	171	1,56
3	424	0,88	1228	6,56	1182	1,63
4	321	1,02	1351	6,14	255	1,63
5	772	1,61	1445	6,27	1318	1,89
6	577	1,18	1841	6,81	498	1,79
7	593	1,75	1406	6,85	492	1,81
8	453	1,65	1691	7,09	335	1,89

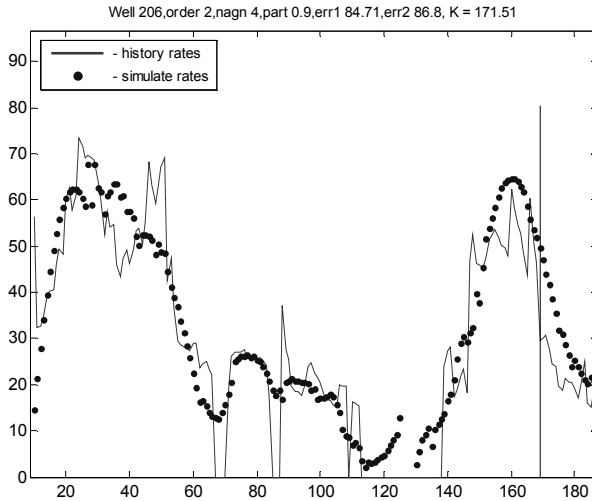


Рис. 1. Результат применения ОНОИ для системы порядка 2

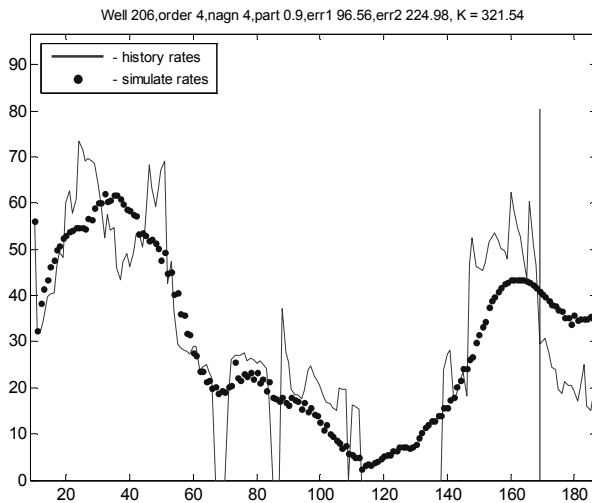


Рис. 2. Результат применения РЕМ для системы порядка 4

На рис. 1 и 2 представлены лучшие по точности найденного решения и времени поиска варианты выполнения алгоритма РЕМ и алгоритма ОНОИ с настройкой параметра фильтра с помощью ГА. Вертикальной чертой разделены дебиты скважины в обучающей и тестовой выборках в отношении 9:1, подробнее эти графики будут описаны при описании эксперимента в пункте 4.2.

На основании представленных результатов далее в поиске оптимальных входных параметров алгоритма для идентификации параметров динамической системы будет использоваться метод ОНОИ с настройкой параметра фильтра с помощью ГА.

4.2. ОПТИМИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Вычисление вкладов в продукцию рассматриваемой скважины от каждой из воздействующих нагнетательных скважин можно представить в виде следующей схемы:

1) нахождение оптимальных значений для количества входов – воздействующих нагнетательных скважин – и порядка n идентифицирующей динамической системы по обучающей выборке данных;

2) моделирование новых исходных данных, где работает лишь одна из нагнетательных скважин (имеет ненулевые дебиты), эти данные подаются на вход построенной системы, на выходе получаем прогностические значения дебитов для исследуемой добывающей скважины;

3) по полученным значениям дебитов добычи в условиях работы отдельных нагнетательных скважин вычисляется вклад каждой участвующей нагнетательной скважины в добычу исследуемой добывающей.

Сначала вычисляется оптимальное значение радиуса окружения, определяющего число рассматриваемых воздействующих скважин, при котором сумма квадратов отклонения моделируемых дебитов рассматриваемой скважины от их исторических значений будет минимальной, см. таблицу 2.

Таблица 2. Выбор значения радиуса окружения на примере скважины № xxx ууу-го месторождения

Радиус отбора, м	424	424	510	583	762	860	894	949
Число скважин	1	2	3	4	5	6	7	8
Миним. ошибка	201	242	428	171	228	358	1059	348
Соотв. порядок	2	1	4	2	2	2	3	2
Устойчивость	1	0	1	1	1	1	0	1

Для каждого значения радиуса согласно приведенному выше алгоритму вычислялся оптимальный порядок системы – порядок, при котором минимальна ошибка отклонения (3). Рассмотрим результаты расчётов для радиуса окружения, позволяющего получить наименьшее значение суммарной ошибки, см. рис.1.

Для расчёта суммарной ошибки данные истории разбиваются на две выборки: обучающая (в данных расчётах для неё бралось 90% исходных данных) и тестовая (оставшиеся 10% данных). Для каждой динамической системы, построенной по выбранным параметрам радиуса окружения и порядка, оценивается, насколько близок прогноз после обучения к данным тестовой выборки. Данные обучения и тестирования на графиках разделены вертикальной линией, сплошная линия показывает исторические значения дебитов, точками показаны рассчитанные месячные дебиты добычи, см. рис. 1.

Далее, для каждой нагнетательной скважины окружения составляется такой набор входных данных дебитов, в котором только эта нагнетательная скважина работает с некоторым постоянным усреднённым дебитом, у остальных же нагнетательных скважин дебиты нулевые. Тогда на выходе получаем прогноз дебитов добывающей скважины, обусловленных воздействием каждой из нагнетательных скважин выбранного окружения в отдельности, см. таблицу 3.

Таблица 3. Прогнозируемые дебиты добычи для отдельного нагнетания

Индекс нагн. скважины	Свободный приток	1	2	3	4
Номер нагн. скважины		15	21	105	106
Дебит без учёта притока, м ³ /сут.	67	8	-19	30	-6

Для нагнетательных скважин с неотрицательными прогнозами добычи составим распределительную диаграмму, см. рис. 3. Рассчитав прогностические дебиты нагнетательных скважин для различных значений радиуса окружения, можно выделить группу скважин, оказывающих относительно стабильное положительное воздействие на продукцию данной добывающей скважины и оценить это воздействие количественно.

5. Результаты работы

В ходе выполнения данной работы была проведена адаптация метода ОНОИ для применения к задаче идентификации воздействия динамики нагнетания жидкости на динамику добычи. Приведённые эксперименты показали, что при данном соотношении количества входов, выходов системы и данной размерности входов метод ОНОИ с настройкой параметров фильтра генетическим алгоритмом превосходит метод РЕМ по точности получаемого данным методом решения и незначительно уступает по времени выполнения.

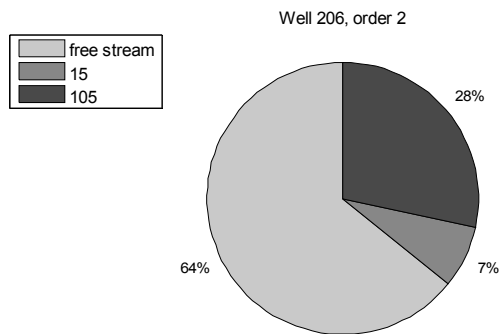


Рис. 3. Распределение неотрицательных дебитов

Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А. Г. *Оптимальные и адаптивные системы*. – М.: Высшая школа, 1989. – 256 с.
2. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р. *Избранные главы теории автоматического управления с примерами в системе MatLab* / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999. – 471 с.
3. Гладков Л. А. *Генетические алгоритмы* / Под ред. В. М. Курейчика ; 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
4. КАТКОВ М. С. *Непрерывные системы адаптивного управления с идентификаторами*. – М.: Издательство МНИ "Мир книги", 1992. – 386 с.
5. ЭЙКХОФФ П. *Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния*: пер. с англ. / Под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 683 с.

6. LJUNG, L. System identification. Theory for user. Second edition. – Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2nd edition, 1999. – 609 p.

THE ANALYSIS OF CONNECTIVITY OF INJECTION AND PRODUCTION WELLS DYNAMICS

Oleg Nadezhdin, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, OOO 'RN-UfaNIPIoil', Ufa, (NadezhdinOV@ufanipi.ru).

Alina Zaminova, Ufa state aviation technical university, OOO 'RN-UfaNIPIoil', Ufa, (ZaminovaAR@ufanipi.ru).

Abstract: The way of discrete dynamic system parameters identification in the form of the generalized adjusted object of measurement is considered. Contrastive analysis of genetic algorithm and exhaustive search efficacy in finding filter parameter's value is completed. The example is adduced of algorithm application for identification of wells connectivity system parameters.

Keywords: dynamic systems identification, method of generalized adjusted object of measurement, genetic algorithm.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.А. Уткиным.