

Идентификация нестационарного динамического объекта методом инвариантного погружения на закрепленном интервале¹

*В. М. Понятский, к. т. н., доцент
ГУП “Конструкторское бюро приборостроения”, Тула
kbkedr@tula.net, pwmru@rambler.ru*

В работе рассмотрено использование нелинейного метода инвариантного погружения для идентификации нестационарных динамических объектов. Предложен подход, обеспечивающий уточнение начальных условий оцениваемых параметров с помощью алгоритмов идентификации в обратном времени. Проведен синтез и исследование алгоритмов оценки в обратном времени нестационарных параметров динамического объекта.

Ключевые слова: идентификация, динамический объект, параметры, невязка, сигнал, помеха, модель, обратное время.

1. Введение

Важной задачей при исследовании объекта управления является оценка его характеристик по результатам измерений информационных сигналов. При натурных испытаниях получают сигналы с объекта управления, функционирующего в условиях пассивного или активного эксперимента. Анализ качества работы объекта управления по результатам его испытаний проводится на основании измеренных информационных сигналов (см. рис. 1). Эти сигналы могут обладать рядом особенностей (зашумленность сигналов, нестационарность сигналов), которые необходимо учитывать при идентификации объекта управления.

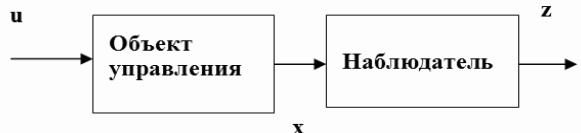


Рис. 1: Исходная схема.

¹©В. М. Понятский, 2011

Нелинейный объект с линейным наблюдателем может быть описан следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned} dx/dt &= f(x, u, t) + G(x, t)w(t); \\ y &= H(t)x(t) + v(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где u — вектор управляющих воздействий; y — вектор наблюдаемых сигналов; x — расширенный вектор состояния, включающий параметры динамического объекта; w — вектор формирующих шумов интенсивностью $R1(t)$; v — вектор шумов измерения интенсивностью $R2(t)$; $G(x, t)$ — матрица коэффициентов; $H(t)$ — матрица наблюдения.

Необходимо по измеряемым входным сигналам (вектору управления U) и выходным сигналам (вектору наблюдения y), при известной структуре объекта (вектор f и матрицу G) и измерителя (матрица наблюдения H) получить оценку элементов f и G .

Важной проблемой при обработке результатов экспериментов является создание программного комплекса, обеспечивающего удобное подключение новых модулей по обработке сигналов и идентификации исследуемых объектов без перекомпиляции исходного текста программы, а также возможность планирования процесса идентификации и последующей работы системы в автоматическом режиме в виде подсистемы работы с проектами, представляющими собой набор действий по обработке сигналов и оценке коэффициентов моделей исследуемого объекта.

2. Метод инвариантного погружения для идентификации нестационарного динамического объекта

Непрерывный алгоритм инвариантного погружения для нелинейного объекта с линейным наблюдателем (1) имеет вид [1]:

$$dx_o/dt = f(x_o, u, t) + PH^T\{y - Hx_o\}/R2; \quad (2)$$

$$dP/dt = GR1G^T + P \frac{\partial f^T(x_o, u, t)}{\partial x_o} + \frac{\partial f(x_o, u, t)}{\partial x_o} P - PH^T R2^{-1} HP,$$

где x_o — оценка расширенного вектора состояний; P — корреляционная матрица ошибок фильтрации.

Алгоритм инвариантного погружения (2) при известных номинальных значениях оцениваемых коэффициентов можно привести к следующему виду:

$$d\Delta x_o/dt = f(x_o, u, t) + PH^T \{y - Hx_o\}/R2;$$

$$x_o = x_n + \Delta x_o; \quad (3)$$

$$dP/dt = GR1G^T + P \frac{\partial f^T(x_o, u, t)}{\partial x_o} + \frac{\partial f(x_o, u, t)}{\partial x_o} P - PH^T R2^{-1} HP.$$

В [2] вводится понятие повторной обработки полученных оценок x_o на закрепленном интервале $[0, N]$. При этом вычисления улучшенных оценок x_{ob} проводится в обратно времени. Например, таким образом можно уточнить начальные условия.

Запишем непрерывный алгоритм инвариантного погружения для нелинейного объекта с линейным наблюдателем (1) в обратном времени. Для этого осуществим в уравнениях (2) замену времени $t = T - \tau$:

$$dx_o/d\tau = -f(x_o, u, \tau) - PH^T \{y - Hx_o\}/R2; \quad (4)$$

$$dP/d\tau = -GR1G^T - P \frac{\partial f^T(x_o, u, \tau)}{\partial x_o} - \frac{\partial f(x_o, u, \tau)}{\partial x_o} P + PH^T R2^{-1} HP.$$

Другой возможный подход связан с возможностью записи исходного уравнения (1) при $t = T - \tau$:

$$\begin{aligned} dx/d\tau &= -f(x, u, \tau) - G(x, \tau)w(\tau); \\ y &= H(\tau)x(\tau) + v(\tau). \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда уравнения (2) для случая (5) будут иметь следующий вид:

$$dx_o/d\tau = -f(x_o, u, \tau) + PH^T \{y - Hx_o\}/R2; \quad (6)$$

$$dP/d\tau = GR1G^T - P \frac{\partial f^T(x_o, u, \tau)}{\partial x_o} - \frac{\partial f(x_o, u, \tau)}{\partial x_o} P - PH^T R2^{-1} HP.$$

Начальными условиями для интегрирования (4) и (6) являются результаты решения (3) в конечном моменте времени $x_o()$.

Результаты вычисления x_o (4) или (6) могут быть использованы для уточнения начальных условий по x_o для (2).

3. Синтез алгоритмов идентификации на основе метода инвариантного погружения

3.1. Исходные данные для проектирования

Зададим переменные расширенного вектора состояний следующим образом:

$x_1(t) = y(t); x_2(t) = K(t); x_3(t) = 1/T(t)$,
где $x_1(t)$ — выходная координата; $x_2(t)$ — коэффициент передачи,
 $x_3(t) = \omega = 1/T(t)$; $T(t)$ — постоянная времени.

Применительно к алгоритму инвариантного погружения (2) имеем:

$$x_o = | y_o \quad K_o \quad \omega_o |^T;$$

$$f(t) = \begin{vmatrix} -y_o\omega_o + K_o\omega_{ro}u \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix};$$

$$\partial f / \partial x_o = \begin{vmatrix} -\omega_o & \omega_{ro}u & -y_o + K_o u \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$G(x_o, t) = \begin{vmatrix} K_o\omega_o & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$w(t) = \begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{vmatrix};$$

$$H = |1 \quad 0 \quad 0|; R2 = r2.$$

3.2. Проектирование алгоритма идентификации в прямом времени

Алгоритм оценки в соответствии с (2) имеет вид [3–4]:

$$dy_o/dt = -y_o\omega_o + K_o\omega_o u + p_{11}(y - y_o)/r2;$$

$$dK_o/dt = p_{12}(y - y_o)/r2; \quad (7)$$

$$d\omega_o/dt = p_{13}(y - y_o)/r2.$$

Уравнение для дисперсий ошибок:

$$\begin{aligned}
 dp_{11}/dt &= -p_{11}^2/r2 + 2(-p_{11}\omega_o + \\
 &+ p_{12}\omega_o u + p_{13}(-y_o + K_o u)) + K_o^2\omega_o^2 r_{111}; \\
 dp_{12}/dt &= -p_{11}p_{12}/r2 - p_{12}\omega_o + \\
 &+ p_{22}\omega_o u + p_{23}(-y_o + K_o u) + r_{122}; \\
 dp_{13}/dt &= -p_{11}p_{13}/r2 - p_{13}\omega_o + p_{23}\omega_o u + p_{33}(-y_o + K_o u) + r_{133}; \\
 dp_{22}/dt &= -p_{12}^2/r2 + r_{122}; \\
 dp_{23}/dt &= -p_{12}p_{13}/r2 + r_{123}; \\
 dp_{33}/dt &= -p_{13}^2/r2 + r_{133}.
 \end{aligned}$$

3.3. Проектирование алгоритма идентификации при известных номинальных значениях оцениваемых коэффициентах

Алгоритм оценки в соответствии с (3) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 d\Delta y_o/dt &= -y_o\omega_{ro} + K_o\omega_o u + p_{11}(y - y_o)/r2; \\
 d\Delta K_o/dt &= p_{12}(y - y_o)/r2; \\
 d\Delta\omega_o/dt &= p_{13}(y - y_o)/r2, \tag{8} \\
 y_o &= y_n + \Delta y_o; \\
 K_o &= K_n + \Delta K_o; \\
 \omega_o &= \omega_n + \Delta\omega_o.
 \end{aligned}$$

Уравнение для дисперсий ошибок:

$$\begin{aligned}
 dp_{11}/dt &= -p_{11}^2/r2 + 2(-p_{11}\omega_o + p_{12}\omega_o u + \\
 &+ p_{13}(-y_o + K_o u)) + K_o^2\omega_o^2 r_{111}; \\
 dp_{12}/dt &= -p_{11}p_{12}/r2 - p_{12}\omega_o + p_{22}\omega_o u + p_{23}(-y_o + K_o u) + r_{122}; \\
 dp_{13}/dt &= -p_{11}p_{13}/r2 - p_{13}\omega_o + p_{23}\omega_o u + p_{33}(-y_o + K_o u) + r_{133}; \\
 dp_{22}/dt &= -p_{12}^2/r2 + r_{122}; \\
 dp_{23}/dt &= -p_{12}p_{13}/r2 + r_{123}; \\
 dp_{33}/dt &= -p_{13}^2/r2 + r_{133}.
 \end{aligned}$$

3.4. Проектирование алгоритма идентификации в обратном времени

Преобразуем полученный алгоритм оценки в соответствии с (4) для обратного времени τ :

$$\begin{aligned} dy_o/d\tau &= y_o \omega_o - K_o \omega_o u - p_{11}(y - y_o)/r2; \\ dK_o/d\tau &= -p_{12}(y - y_o)/r2; \\ d\omega_o/d\tau &= -p_{13}(y - y_o)/r2. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение для дисперсий ошибок:

$$\begin{aligned} dp_{11}/d\tau &= p_{11}^2/r2 - 2(-p_{11}\omega_o + p_{12}\omega_o u + \\ &\quad + p_{13}(-y_o + K_o u)) - K_o^2\omega_o^2 r_{11}; \\ dp_{12}/d\tau &= p_{11}p_{12}/r2 + p_{12}\omega_o - p_{22}\omega_o u - p_{23}(-y_o + K_o u) - r_{12}; \\ dp_{13}/d\tau &= p_{11}p_{13}/r2 + p_{13}\omega_o - p_{23}\omega_o u - p_{33}(-y_o + K_o u) + r_{13}; \\ dp_{22}/d\tau &= p_{12}^2/r2 - r_{122}; \\ dp_{23}/d\tau &= p_{12}p_{13}/r2 - r_{123}; \\ dp_{33}/d\tau &= p_{13}^2/r2 - r_{133}. \end{aligned}$$

Непрерывный алгоритм оценки для обратного времени в соответствии (6) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} dy_o/d\tau &= y_o \omega_o - K_o \omega_o u + p_{11}(y - y_o)/r2; \\ dK_o/d\tau &= p_{12}(y - y_o)/r2; \\ d\omega_o/d\tau &= p_{13}(y - y_o)/r2. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнение для дисперсий ошибок:

$$\begin{aligned} dp_{11}/d\tau &= -p_{11}^2/r2 + 2(-p_{11}\omega_o + \\ &\quad + p_{12}\omega_o u + p_{13}(-y_o + K_o u)) + K_o^2\omega_o^2 r_{11}; \\ dp_{12}/d\tau &= -p_{11}p_{12}/r2 - p_{12}\omega_o + p_{22}\omega_o u + p_{23}(-y_o + K_o u) + r_{12}; \\ dp_{13}/d\tau &= -p_{11}p_{13}/r2 - p_{13}\omega_o + p_{23}\omega_o u + p_{33}(-y_o + K_o u) + r_{13}; \\ dp_{22}/d\tau &= -p_{12}^2/r2 + r_{122}; \\ dp_{23}/d\tau &= -p_{12}p_{13}/r2 + r_{123}; \\ dp_{33}/d\tau &= -p_{13}^2/r2 + r_{133}. \end{aligned}$$

3.5. Проектирование алгоритма идентификации с повышенным порядком модели оцениваемых параметров

Зададим переменные расширенного вектора состояний следующим образом:

$$x_1(t) = y(t); x_2(t) = K(t); x_3(t) = 1/T(t); x_4(t) = dK(t)/dt;$$

$$x_5(t) = d(1/T(t))/dt,$$

где $x_1(t)$ — выходная координата; $x_2(t)$ — коэффициент передачи, $x_3(t)$ — постоянная времени; $x_4(t)$ — скорость изменения $K(t)$; $x_5(t) = v$ — скорость изменения $\omega_o = 1/T(t)$.

Применительно к алгоритму инвариантного погружения (2) имеем:

$$x_o = | \begin{array}{ccccc} y_o & K_o & \omega_o & dK_o(t)/dt & d\omega_o(t)/dt \end{array} |^T;$$

$$G(x_o, t) = \begin{vmatrix} K_o \omega_o & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$f(t) = \begin{vmatrix} -y_o \omega_o + K_o \omega_o u \\ dK(t)/dt \\ d\omega_o/dt \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix};$$

$$\partial f / \partial x_o = \begin{vmatrix} -\omega_o & \omega_o u & -y_o + K_o u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$w(t) = \begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{vmatrix};$$

$$H = | \begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} |; R2 = r2.$$

Алгоритм оценки в этом случае имеет вид:

$$dy_o/dt = -y_o\omega_o + K_o\omega_o u + p_{11}(y - y_o)/r^2;$$

$$dK_o/dt = \mu_o + p_{12}(y - y_o)/r^2;$$

$$d\omega_o/dt = v_o + p_{13}(y - y_o)/r^2;$$

$$d\mu_o/dt = p_{14}(y - y_o)/r^2;$$

$$dv_o/dt = p_{15}(y - y_o)/r^2.$$

4. Программная реализация алгоритмов идентификации нестационарных динамических объектов

Проведена реализация разработанных алгоритмов.

4.1. Назначение программного комплекса “Идентификация”

Программный комплекс [3] Идентификация предназначен для выполнения оценки характеристик динамических объектов различными методами и является дальнейшим развитием программы Идентификация [5]. Вид главного окна работающего приложения приведен на рис. 2.

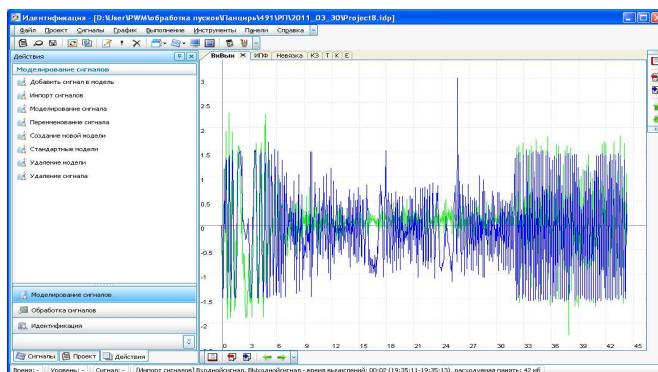


Рис. 2: Главное окно системы “Идентификация”.

Входными данными для алгоритмов идентификации являются сигналы с входа и с выхода исследуемого динамического объекта. Программный комплекс дополнительно предоставляет набор методов предварительной обработки сигналов и генерации сигналов с заданными параметрами, а также включает подсистему визуализации сигналов, упрощающую работу с сигналами и анализ результатов обработки.

4.2. Плагины (подключаемые модули) в системе “Идентификация”

Каждый метод обработки в системе Идентификация реализуется отдельным подключаемым модулем (иначе говоря, плагином). Плагины загружается из .NET сборок, находящихся в подкаталоге Plugins каталога приложения, имеющих расширение dll и поддерживающих интерфейс IPlugin. Для каждой загруженной сборки создается свой собственный программный объект. Созданный объект регистрируется в главном меню приложения и в списке “Действия” (рис. 2).

4.3. Работа с проектом в системе “Идентификация”

В системе Идентификация проектом называется совокупность действий над сигналами. Проект формируется автоматически при работе с приложением, т. е. каждое проделанное над сигналами действие сразу добавляется в проект. Проект сохраняется в бинарный файл – это обеспечивает удобство работы с приложением и повторяемость результатов, а также обработку новых измерений по отработанному алгоритму. При загрузке проектачитываются указанные в нем действия, затем для каждого действия ищется выполняющий его плагин и, если плагин нашелся, то действие выполняется. Результатом выполнения проекта будет набор сигналов.

4.4. Сигналы и модели в системе “Идентификация”

Под моделью в системе Идентификация понимается логическая группа сигналов. Например, сигналы оценок параметров динамического объекта – оценка коэффициента и оценка постоянной време-

мени – представляют модель. Группировка сигналов по моделям облегчает работу с приложением. Для каждого сигнала есть возможность задать его цвет, выделить сигнал на графике, поставить флажок котображать или не отображать, а также просмотреть подробную информацию о сигнале: время начала, время завершения, шаг дискретизации, имя действия, в котором сигнал создан. Аналогичная функциональность доступна и в отношении моделей.

4.5. Реализация алгоритмов идентификации на основе метода инвариантного погружения

Пользовательский интерфейс плагина “Инвариантное погружение” приведен на рис. 3.

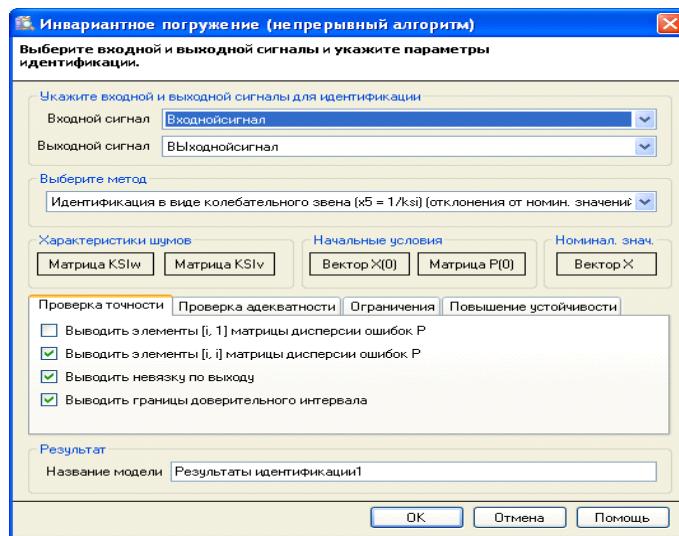


Рис. 3: Пользовательский интерфейс плагина “Инвариантное погружение”.

В разработанном приложении были реализованы возможности идентификации параметров модели, приведенные в подразделах 3.1–3.5.

5. Результаты

На рис. 4–6 приведены результаты оценки коэффициента передачи и постоянной времени в прямом и обратном времени.

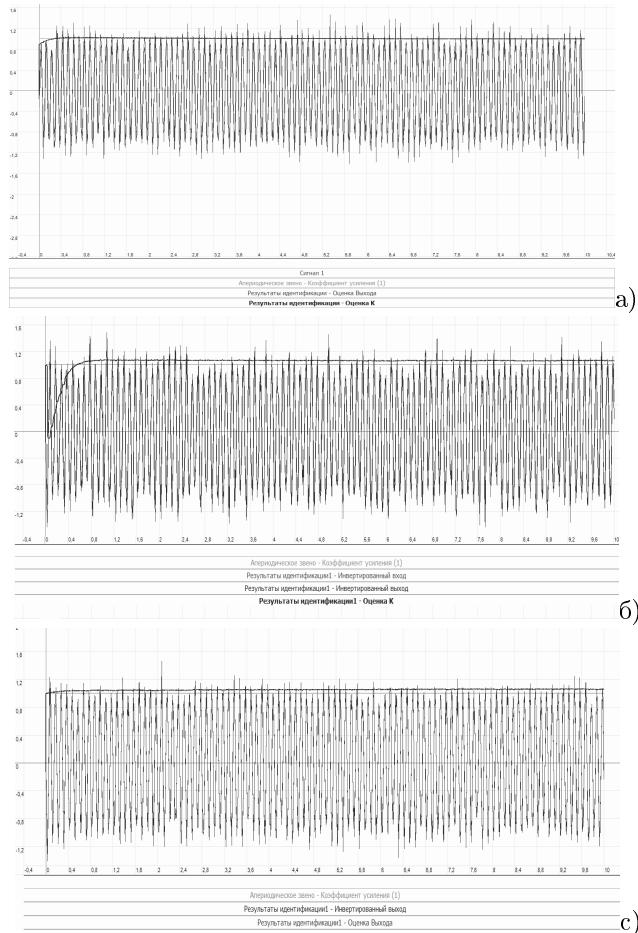


Рис. 4: Результаты оценки коэффициента передачи в прямом времени а – (7) и в обратном времени: б – (9); с – (10).

Сравнение полученных результатов показывает, что оценки коэффициента передачи и постоянной времени в прямом и обратном

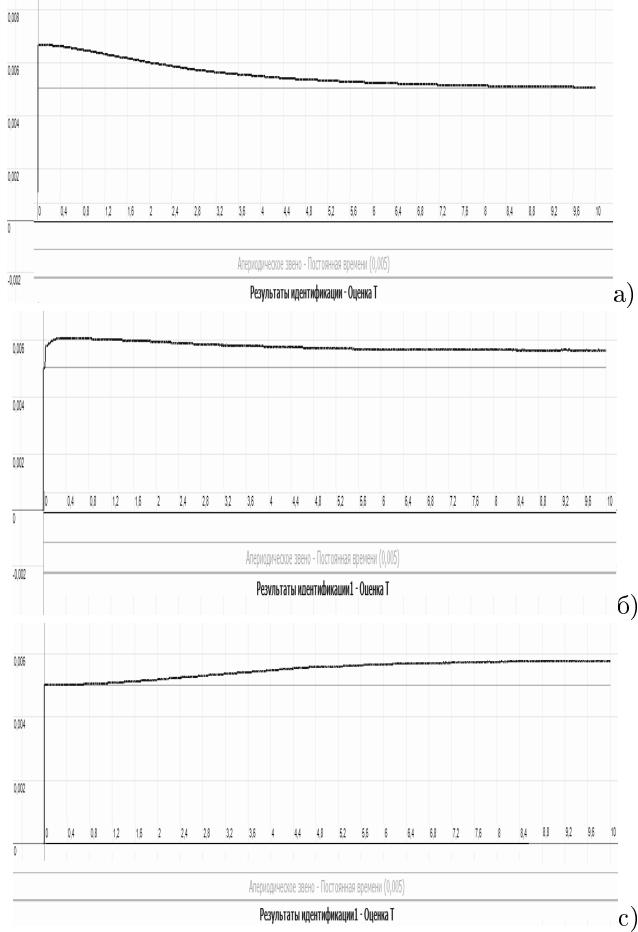


Рис. 5: Результаты оценки постоянной времени в прямом времени а – (7) и в обратном времени: б – (9); с – (10).

времени близки. Оценки для корреляционной матрицы 11 имеют различный характер, так для прямого времени (9) и обратного времени (12) они имеют положительное, но разные значения, а для обратного времени (11) имеют отрицательные значения.

Результаты вычисления полученных оценок в обратном време-

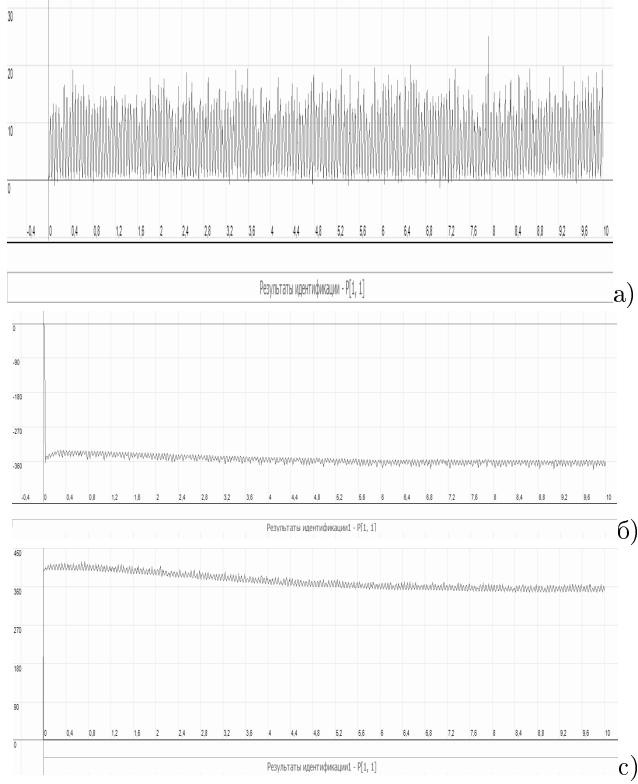


Рис. 6: Результаты оценки 11 в прямом времени а – (7) и в обратном времени: б – (9); с – (10).

ни могут быть использованы для уточнения начальных условий оценок в прямом времени.

6. Заключение

Таким образом, в работе рассмотрен нелинейный метод инвариантного погружения для идентификации нестационарного динамического объекта. Предложен подход, обеспечивающий уточнение начальных условий оцениваемых параметров с помощью алгоритма идентификации в обратном времени. Проведен синтез алгоритмов

оценки нестационарных параметров динамического объекта.

Разработан программный комплекс Идентификация, в котором обеспечивается возможность подключения произвольного набора пользовательских модулей, реализующих различные методы обработки данных и идентификации. Реализована подсистема работы с проектами, обеспечивающая планирование обработки результатов и последующую работу системы в автоматическом режиме. Каждый проект представляет собой набор действий по созданию и обработке сигналов. Проведено тестирование полученных алгоритмов и сформированы рекомендации по их настройке.

Разработанный программный комплекс используется для обработки экспериментальных данных.

Список литературы

- [1] Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976.
- [2] Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. – М., Энергия. 1973.
- [3] Понятский В.М., Замотаев И.В., Киселев В.Б. Идентификация нестационарного динамического объекта с использованием метода инвариантного погружения // Материалы VII Международной конференции “Идентификация систем и задачи управления”(28-31 января, 2008) – М.: ИПУ, 2008.
- [4] Понятский В.М. Оценка экспериментальных характеристик летательного аппарата методом инвариантного погружения // Первая Всероссийская научно-техническая конференция кФундаментальные основы баллистического проектирования. 23-26 июня 2008 г.: Сборник материалов — Санкт-Петербург. БГТУ. 2008. Т. 1 С. 29–33
- [5] Понятский В.М., Оберман М.С. Программа для идентификации методом фильтрации Калмана параметров линейной нестационарной модели динамического объекта // Труды международной конференции “Третий Окуневские чтения”. Ч.3. — СПб.:БГТУ, 2003.