

# ИДЕНТИФИКАТОР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИДП-1 НА БАЗЕ СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА ADSP-21990

А.Г. Александров

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [alex7@ipu.rssi.ru](mailto:alex7@ipu.rssi.ru)

Д.А. Хомутов

*Электростальский Политехнический Институт*

Россия, 144000, Московская обл., г. Электросталь, ул. Первомайская, д. 7

E-mail: [da-khom@yandex.ru](mailto:da-khom@yandex.ru)

**Ключевые слова:** частотная идентификация, программное обеспечение, экспериментальные исследования, сигнальный микропроцессор

**Key words:** frequency identification, software, experimental investigations, DSP-processor

Приводятся результаты экспериментального исследования идентификатора динамических процессов ИДП-1. ИДП-1 – это программа на ассемблере для сигнального микропроцессора ADSP-21990. ИДП-1 предназначен для идентификации динамических объектов, находящихся под воздействием неизвестного ограниченного внешнего возмущения. При этом должны быть известны границы постоянных времени этого объекта. При экспериментальных исследованиях использовался физический аналог объекта (ФАО), который является электронным устройством, описываемым дифференциальным уравнением. ФАО содержит встроенный источник внешних возмущений. Проведенные исследования показали высокую точность идентификации.

**DYNAMIC PROCESSES' IDENTIFIER IDP-1 BASED ON ADSP-21990 MIXED SIGNAL CONTROLLER** / A.G. Alexandrov (Institute of Control Sciences, 65 Profsoyuznaya, Moscow 117997, Russia, E-mail: [alex7@ipu.rssi.ru](mailto:alex7@ipu.rssi.ru)), D.A. Khomutov (Electrostal Polytechnical Institute, 7 Pervomayskaya, Electrostal, Moscow region, Russia, E-mail: [da-khom@yandex.ru](mailto:da-khom@yandex.ru)). Results of experimental investigations of the dynamic processes' identifier IDP-1 are given. The IDP-1 is an assembler program for ADSP-21990 Mixed Signal Controller. The IDP-1 intends for a dynamic plant identification. An external disturbance, which is an unknown – but – bounded function, is fed to the plant. A plant physical model (PPM), which is a electronic device described, was used in the experiments. The PPM contains a source of the external disturbance. The experimental investigations show a high accuracy of identification.

## 1. Введение

К настоящему времени разработан ряд методов идентификации объектов управления, описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Эти методы условно можно разделить на две группы, в зависимости от предположений о помехах измерения и внешних возмущениях, приложенных к объекту.

Первую группу составляют методы идентификации объектов, помехи и возмущения в которых – случайные процессы с известными статистическими характеристиками. Это различные варианты метода наименьших квадратов и метода стохастической аппроксимации и т. д. Их описание приводится в известных книгах [1], [2].

Вторая группа – это методы идентификации при известных ограниченных помехах и возмущениях: рандомизированные алгоритмы [3] и конечно-частотная идентификация [4]. В соответствии с методом конечно-частотной идентификации объект возбуждается полигармоническим испытательным сигналом (число гармоник которого равно размерности вектора состояния объекта). Амплитуды гармоник испытательного сигнала должны выбираться так, чтобы вход и выход объекта были в зоне линейности исполнительных и измерительных устройств. Если же эти амплитуды выбираются малыми, то это приводит к существенному увеличению длительности идентификации. Эта длительность (которая зависит, в частности, от реализовавшегося внешнего возмущения) также должна быть задана. Для определения частот испытательного сигнала необходимо также знание свойств объекта, так как интуитивно ясно, что эти частоты должны лежать в диапазоне частот излома ЛАЧХ объекта. Все это требует большого объема информации об объекте.

Идентификатор динамических процессов ИДП-1 – это программа на ассемблере для сигнального микропроцессора ADSP-21990 [5, 6]. ИДП-1 предназначена для идентификации объектов, находящихся под воздействием неизвестного ограниченного внешнего возмущения. При этом должны быть известны границы постоянных времени объекта. Это позволяет априори выбрать испытательные частоты и их амплитуды. Длительность идентификации находится путем сравнения результатов идентификации при различных ее значениях.

Развитие метода конечно-частотной идентификации [7 – 10] в последние годы позволило построить алгоритм самонастройки амплитуд гармоник испытательного сигнала и длительности идентификации [8], а также метод определения границ испытательных частот [7]. Это дает возможность идентифицировать объект управления с существенно меньшими сведениями об объекте.

Ограниченные возможности микропроцессора ADSP-21990 не позволили реализовать алгоритмы самонастройки амплитуд и частот испытательного сигнала, а также самонастройки длительности идентификации. Поэтому область применения ИДП-1 ограничена объектами с известными границами постоянных времени.

## 2. Алгоритм идентификации

Рассмотрим асимптотически устойчивый объект, описываемый дифференциальным уравнением

$$(1) \quad y^{(n)} + d_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + d_1\dot{y} + d_0y = k_r u^{(\gamma)} + \dots + k_1\dot{u} + k_0u + f, \\ t \geq t_0,$$

где  $y(t)$  – измеряемый выход,  $u(t)$  – измеряемый вход, формируемый для целей идентификации и называемый испытательным сигналом,  $f(t)$  – неиз-

вестное ограниченное возмущение:  $|f(t)| \leq f^*$ , где  $f^*$  – положительное число. Коэффициенты  $d_i$  и  $k_j$  ( $i = \overline{0, n-1}, j = \overline{0, \gamma}$ ) – неизвестные числа ( $\gamma < n$ ).

Алгоритм идентификации основан на методе конечно-частотной идентификации [4]. В соответствии с этим методом объект возбуждается испытательным сигналом, который представляет собой сумму гармоник, число которых не превышает числа  $n$  (размерности вектора пространства состояния объекта).

Для идентификации объекта (1) используется испытательный сигнал

$$(2) \quad u(t) = \sum_{i=1}^n \rho_i \sin \omega_i t,$$

где  $\rho_i$  и  $\omega_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – его заданные испытательные амплитуды и частоты. Сигнал (2) формируется генератором испытательного сигнала.

Алгоритм идентификации состоит из трех частей: генерации испытательного сигнала  $u$ , фильтрации выхода объекта с помощью фильтра Фурье и решения частотных уравнений.

На вход фильтра Фурье подается выход объекта  $y$ . Выходом фильтра являются оценки частотных параметров:

$$(3) \quad \hat{\alpha}_i = \frac{2}{\rho_i \tau} \int_{t_F}^{t_F + \tau} y(t) \sin \omega_i (t - t_F) dt,$$

$$\hat{\beta}_i = \frac{2}{\rho_i \tau} \int_{t_F}^{t_F + \tau} y(t) \cos \omega_i (t - t_F) dt,$$

$$i = \overline{1, n},$$

где  $\tau$  – время фильтрации;  $t_F$  – момент начала фильтрации;  $\hat{\alpha}_i$  и  $\hat{\beta}_i$  – оценки частотных параметров объекта (1), точные значения которых являются вещественной и мнимой частями его частотной передаточной функции

$$(4) \quad \alpha_i + j\beta_i = \frac{k(j\omega_i)}{d(j\omega_i)}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Нахождение оценок коэффициентов (1) основано на решении частотных уравнений

$$(5) \quad k(j\omega_i) = (\alpha_i + j\beta_i) d(j\omega_i), \quad i = \overline{1, n}.$$

Это система линейных алгебраических уравнений с неизвестными коэффициентами  $k_i$  и  $d_i$ .

### 3. Реализация идентификатора

Идентификатор динамических процессов ИДП-1 реализован на основе платы ADSP-21990 EZ-KIT Lite и программы алгоритма идентификации d111\_219. Плата представляет собой электронное устройство – микропроцессорную систему на основе сигнального процессора ADSP-21990. Программа d111\_219 написана на ассемблере DSP процессоров семейства ADSP-219x для условий платы.

### **3.1. Аппаратное обеспечение**

Плата имеет аналоговые интерфейсы входов и выходов, которые связывают процессор с аналоговыми устройствами. Таким образом, плата позволяет осуществлять цифровую обработку сигналов. Процессор имеет интегрированный 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с диапазоном входа плюс минус 1 В. На плате имеется цифро-аналоговый 12-разрядный преобразователь с диапазоном от 0 до 2 В. Также плата содержит интерфейс последовательного СОМ-порта, что позволяет подключать к идентификатору различные устройства. Плата имеет внешнюю статическую память и флэш-память.

### **3.2. Программное обеспечение**

Программа написана на ассемблере DSP для сигнальных процессоров ADSP-219x. Она состоит из блоков (подпрограмм):

- подпрограммы «общения» с АЦП и ЦАП платы;
- блоки инициализации устройств АЦП, ЦАП, таймера, прерываний и т. п.;
- блоки, реализующие генерацию испытательного сигнала, фильтра Фурье и решение частотного уравнения;
- блоки арифметики для чисел в формате с плавающей точкой.

**3.2.1. Схема алгоритма программы.** На рис. 1 приведена схема алгоритма работы программы. Как видно, программа начинает свою работу с включением питания платы и работает с остановкой только лишь при установке точки останова пользователем на команде, соответствующей этой точке останова (об этом подробнее в п. 3.2.2). Первые несколько блоков – инициализация работы различных устройств и подготовка их работы по заданным параметрам идентификации, далее в цикле – сам алгоритм.

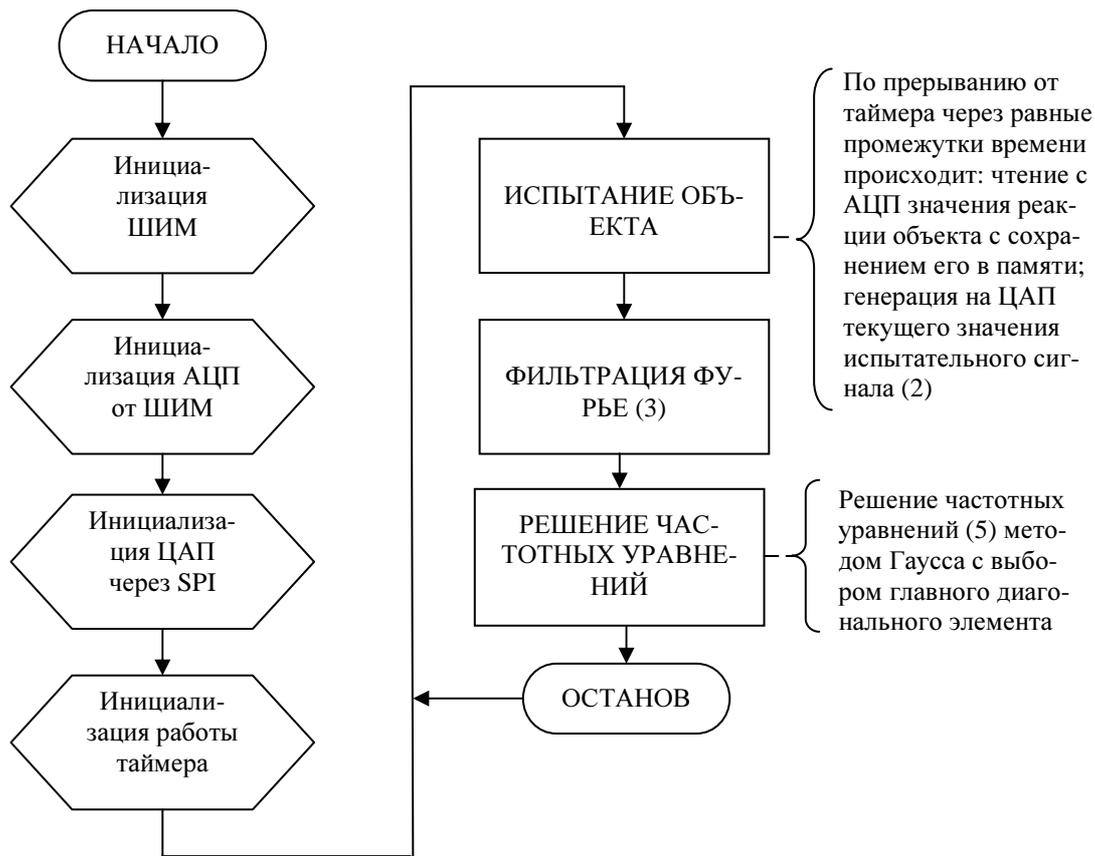


Рис. 1. Схема алгоритма программы

Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) способен выдавать прямоугольные сигналы различной частоты и скважности периода. В данном случае старт преобразования АЦП сконфигурирован от этого сигнала, поскольку имеется такая возможность. В блоке «Инициализация ШИМ» происходит настройка одного из его выводов на необходимую частоту дискретизации.

В блоке «Инициализация АЦП от ШИМ» осуществляется соответствующая конфигурация.

В блоке «Инициализация ЦАП через SPI» осуществляется настройка SPI-интерфейса на заданную частоту дискретизации вывода значений через него на ЦАП.

В блоке «Инициализация таймера» задается частота работы таймера по принципу, используемому при инициализации ШИМ. Вся особенность таймера заключается в том, что таймер можно инициализировать в более широких пределах частоты дискретизации. Кроме этого, в данном блоке происходит настройка прерывания от импульса таймера.

Программа при компиляции в DSP-код занимает в памяти процессора приблизительно 1940 слов памяти инструкций. Из них арифметика занимает около 500-650 слов, алгоритм решения частотных уравнений – 600 слов, фильтрация с генерацией сигнала - соответственно 250 и 150. Остальные 250-300 слов – вся инициализация.

**3.2.2. Программный проект.** Программа представляет собой программный проект d111\_219 для среды VisualDSP++. Он представляет собой набор исходных текстов программ и функций и текст описателя линкера (рис. 2). Файлы линкера имеют расширение \*.ldf (в данном случае – <ADSP-21990.ldf>),

файлы исходных текстов программ и функций, написанных ассемблере - \*.dsp.

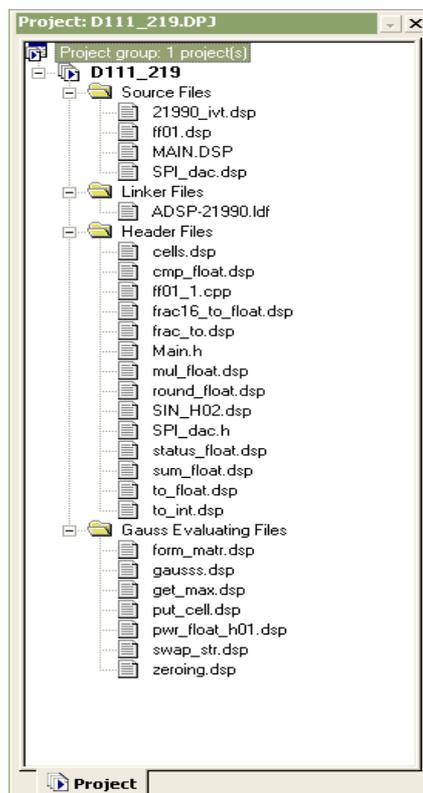


Рис. 2. Проект d111\_219

Как видно на рис. 2, все подключаемые файлы условно разбиты на 4 директории: Source Files – директория с основными файлами алгоритма:

- 21990\_ivt – определения прерываний;
- Ff01.dsp – содержит подпрограмму фильтра Фурье, которая вызывается из главной программы в файле Main.dsp;
- Main.dsp – генерация испытательного сигнала, инициализации АЦП и ЦАП, таймера, прерываний;
- SPI\_dac – вывод значений на ЦАП через SPI-интерфейс.

Директория Header Files – содержит множество подпрограмм арифметики для чисел в формате с плавающей точкой, среди которых файлы Main.h и SPI\_dac.h – файлы служебных определений.

Директория Gauss Evaluating Files – содержит алгоритмы решения системы алгебраических уравнений методом Гаусса, предназначенного для решений частотной матрицы. Главный файл алгоритма, который вызывает подпрограммы из всех остальных файлов – gauss.dsp. Он вызывается из главной программы Main.dsp.

Все основные переменные (параметры идентификации) определены в файле «ff01\_1.cpp» как программа на языке C++. В файлах-заголовках «Main.h» и «SPI\_dac.h» определены константы и макроопределения для служебных целей.

После настройки параметров идентификации следует выполнить компиляцию программы с последующей загрузкой (команда «build Project» в

VisualDSP++). Старт программы начинается с прерывания Reset, которое описано в файле 21990\_ivt.dsp. Далее управление передается файлу Main.dsp. Точка останова при желании может быть установлена на команде «jump fourier;». Тогда идентификация будет выполнена один раз, и если программу далее запустить на исполнение, то можно повторить идентификацию при тех же параметрах. Для того чтобы использовать другие параметры идентификации, нужно произвести их замену в соответствующих файлах и перекомпилировать проект.

## 4. Экспериментальное исследование

### 4.1. Стенд для экспериментальных исследований

Стенд эксперимента (рис. 3) состоит из трех частей: физический аналог объекта (ФАО), идентификатор и ПЭВМ.

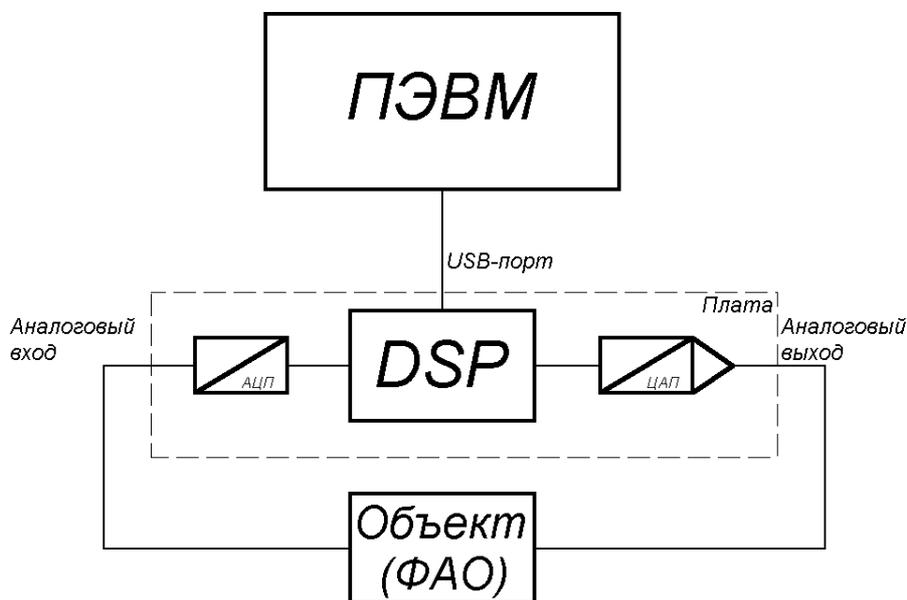


Рис. 3. Стенд «ФАО-ADSP-ПЭВМ»

ФАО представляет собой электронное устройство, работа которого описывается линейными (в пределах насыщения до напряжения питания) дифференциальными уравнениями третьего порядка. Передаточная функция объекта следующая:

$$(6) \quad W(s) = \frac{-200s + 5000}{s^3 + 62s^2 + 2620s + 5000}.$$

ФАО имеет аналоговые вход и выход. Допустимое напряжение питания – до 12 В, что позволяет использовать сигналы в пределах плюс минус 6 В, т. е. эти пределы в 2 раза меньше используемого напряжения питания.

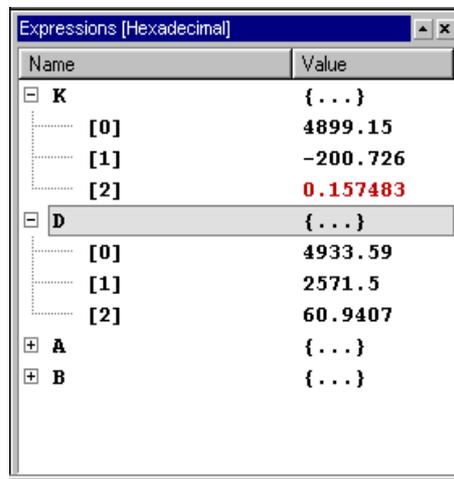
ПЭВМ подключается к плате через USB-порт и представляет собой средство визуализации данных идентификации. Кроме того, ЭВМ позволяет загрузить программу и запустить ее на исполнение, а также отладить. Это позволяет среда разработки VisualDSP++ для ОС Windows.

## 4.2. Результаты эксперимента

**4.2.1. Параметры алгоритма идентификации.** При экспериментальном исследовании используются следующие значения параметров фильтрации. Шаг дискретности  $h = 0,0002$  с; испытательные частоты:  $\omega_1 = 2,51327$ ,  $\omega_2 = 40,2124$ ,  $\omega_3 = 62,8318$  рад/с; амплитуды гармоник  $\rho_i = 0,25$  В,  $i = \overline{1,3}$ . Время фильтрации выбрано равным  $\tau = 2,5$  с, Момент начала фильтрации –  $t_F = 2,5$  с.

**4.2.2. Результаты идентификации.** Получены следующие результаты идентификации – рис. 4, где К – коэффициенты полинома числителя (начиная с младшей степени), D – коэффициенты полинома знаменателя. Таким образом, искомая передаточная функция:

$$(7) \quad \hat{W}(s) = \frac{0,157s^2 - 200,726s + 4899,15}{s^3 + 60,9407s^2 + 2571,5s + 4933,59}.$$



Name	Value
<b>K</b>	{...}
[0]	4899.15
[1]	-200.726
[2]	0.157483
<b>D</b>	{...}
[0]	4933.59
[1]	2571.5
[2]	60.9407
<b>A</b>	{...}
<b>B</b>	{...}

Рис. 4. Результаты работы программы

Сравнивая передаточные функции (6) и (7), заключаем, что погрешность оценки не превышает 2%.

## Список литературы

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
2. Льюнг Л. Идентификация систем // Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
3. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003.
4. Alexandrov A.G. Finite-frequency method of identification // 10-th IFAC Sympos. Syst. Identification. Reprints. 1994. V. 2. P. 523-527.
5. ADSP-21990 Mixed Signal DSP Controller with CAN // Data Sheet // Analog Devices, Inc., 2002.
6. Руководство пользователя по сигнальным микропроцессорам семейства ADSP-2100 / Под ред. А.Д. Викторова. СПб.: изд-во ЛЭТИ, 1997. 518 с.
7. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: граница частот испытательного сигнала // АиТ. 2001. Т. 62. №11.

8. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: самонастройка испытательного сигнала // Сб. научных трудов «Робастное управление и частотная идентификация». Электросталь, ЭПИ МИСиС, 2004, с. 67 – 97.
9. Alexandrov A.G. Finite-frequency identification: self tuning of test signal. // 16<sup>th</sup> world congress of IFAC, Preprints, Praha, 2005.
10. Alexandrov A.G., Orlov Ju. F. Frequency adaptive control of multivariable plants. // 15<sup>th</sup> world congress of IFAC, Preprints, Barcelona, 2002.