

**ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА ДВОИЧНОЙ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

© 2011 В. Ф.Яковлев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 05.05.2010

Рассмотрен алгоритм выбора характеристического полинома М-последовательности заданной степени при синтезе тест-сигнала для идентификации нелинейных динамических объектов, позволяющего без смешивания оценивать наибольшее число ординат ядер Вольтера первого и второго порядков.
Ключевые слова: ряд Вольтера, тест-сигнал, двоичная М-последовательность

Для идентификации нелинейных динамических объектов используются их различные модели, в том числе и отрезок ряда Вольтерра, в дискретном случае имеющий вид:

$$y[i] = h_0 + \Delta t \cdot \sum_{j=0}^{N-1} h[j] \cdot x[i-j] + \Delta t^2 \cdot \sum_{k=0}^{Q-1} \sum_{l=0}^{Q-1} h[k,l] \cdot x[i-k] \cdot x[i-l], \tag{1}$$

здесь $y[i]$ – реакция объекта, Δt – шаг дискретизации, $x[i]$ – входной сигнал, h_0 , $h[j]$, $h[k,l]$ – ординаты ядер Вольтерра N , Q – времена памяти ядер первого и второго порядков [1].

На практике для независимой оценки ординат ядер Вольтерра при идентификации применяют ортогональные к сдвигу кусочно-постоянные тест-сигналы небольшой амплитуды, не нарушающие нормальное функционирование объекта, тогда при измерении реакции объекта один раз на такте тест-сигнала:

$$h[j] = \frac{\sum_{i=0}^p y[i] \cdot x[i-j]}{\sum_{i=0}^p x^2[i-j]};$$

$$h[k,l] = \frac{\sum_{i=0}^p y[i] \cdot x[i-k] \cdot x[i-l]}{\sum_{i=0}^p x^2[i-k] \cdot x^2[i-l]}. \tag{2}$$

Здесь p – число замеров, размерность плана эксперимента.

Для моделей динамики используют субоптимальные композиционные планы эксперимента с ядрами в виде планов Плакетта-Бермана или двоичных (троичных) М-последовательностей [1,2]. В композиционных планах эксперимента для моделей динамики строки ядра плана соответствуют двоичным числам, появляющимся в регистре сдвига аппаратного или программного генератора М-последовательности на каждом такте.

Яковлев Вадим Фридрихович, кандидат технических наук, доцент кафедры “Теоретическая и общая электротехника”. E-mail: vf7415@mail.ru

Отметим, что в литературе имеется недостаточно сведений о практической стороне синтеза субоптимальных тест-сигналов на основе М-последовательностей с использованием современных аппаратных и программных средств. Цель этой статьи частично восполнить этот пробел путем разработки алгоритма и программы для отбора двоичных М-последовательностей с необходимыми корреляционными свойствами, пригодных для использования в тест-сигналах.

Двоичная М-последовательность является упорядоченным с помощью сопровождающей матрицы (характеристического полинома $F(x)$), множеством компонент S_i вектора координат элементов поля Галуа $GF(2^n)$ в степенном базисе [4]. М-последовательность, генерируемая с помощью характеристического полинома степени n , имеет период $(2^n - 1)$ такт.

При генерации тест-сигналов эти компоненты заменяются реальными сигналами с нормированными значениями:

$$x(0) = +1; \quad x(1) = -1. \tag{3}$$

Умножение для реальных сигналов оказывается эквивалентным сложению по модулю 2 для компонент S_i :

$$\begin{matrix} 1 \oplus 0 = 1 & (-1) \cdot (+1) = -1 \\ 1 \oplus 1 = 0 & (-1) \cdot (-1) = +1 \\ 0 \oplus 0 = 0 & (+1) \cdot (+1) = +1 \\ 0 \oplus 1 = 1 & (+1) \cdot (-1) = -1 \end{matrix} \tag{4}$$

Для независимой оценки ординат h_0 и $h[k, k]$ в тест-сигнал на основе двоичной М-последовательности вводятся дополнительные такты, после чего полный факторный композиционный план содержит $(2^n + 2n + 1)$ строк, а тест-сигнал – $(2^n + 2n + 4N - 3)$ тактов [2]. Дополнительные такты необходимы также для устранения погрешности от неверного задания исходного состояния объекта перед началом тестирования. В качестве примера на рис. 1 приведен композиционный сигнал на основе двоичной М-последовательности с характеристическим полиномом $F(x) = x^3 + x + 1$, ам-

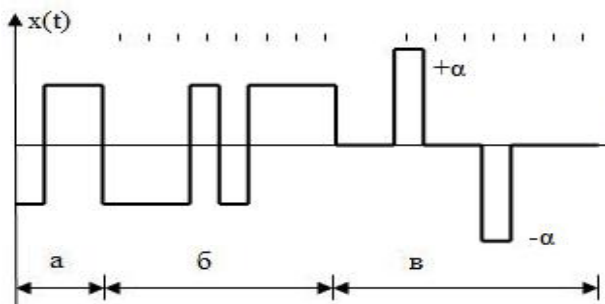


Рис. 1. Композиционный сигнал на базе двоичной М-последовательности:
а – формирование начальных условий,
б – ядро плана, в – дополнительные такты для оценки h_0 и $h[k, l]$

плитуды дополнительных импульсов α определяются по параметрам плана, точки указаны моменты измерения реакции объекта [2].

М-последовательности с запаздыванием $j > n$ являются линейными комбинациями последовательностей с запаздываниями в диапазоне $(1 \div n)$ того же характеристического полинома:

$$S_{i-j} = a_1 \cdot S_{i-1} \oplus a_2 \cdot S_{i-2} \oplus \dots \oplus a_n \cdot S_{i-n}. \quad (5)$$

Коэффициенты a_i в (5) совпадают с коэффициентами полинома-остатка $R_j(x)$ в $GF(2^n)$ [4]:

$$R_j(x) = x^j \text{ mod } F(x). \quad (6)$$

Выражение (6) иногда называют алгоритмом Дэвиса, его применяют для генерации задержанных М-последовательностей при идентификации линейных динамических объектов.

В специализированной литературе имеются таблицы коэффициентов полиномов различных степеней для генерации М-последовательностей. Нужно выбрать полином, обеспечивающий раздельную оценку ординат $h[j]$ и $h[k, l]$ при наи-

меньшей длине тест-сигнала и известных временах памяти ядер Вольгерра N и Q .

Комбинированный тест-сигнал на базе М-последовательности длиной $(2^n - 1)$ тактов позволяет раздельно оценивать по (2) п ординат ядра первого порядка и $(n-p)$ ординат ядра второго порядка. Для большинства реальных динамических систем $N > Q$, поэтому выбираем разрядность p полинома $F(x)$ так, чтобы значимые ординаты ядра $h[k, l]$ полностью размещались в квадрате $n-p$. Если нужно произвести идентификацию динамического объекта со временем памяти ядра Вольгерра первого порядка большим p , потребуется генерировать реплики М-последовательности с запаздыванием $j > n$ и изменить параметры дополнительной части тест-сигнала.

При использовании запаздывания $j > n$ оценки ординат $h[j]$ и $h[k, l]$ могут оказаться смешанными в силу (5), если:

$$x[i-j] = x[i-k] \cdot x[i-l]. \quad (7)$$

Алгоритм для отбора характеристических полиномов М-последовательностей состоит в том, что по (6) определяем максимальное запаздывание $j > n$, при котором в полиноме-остатке не менее трех ненулевых коэффициентов, то есть оценки $h[j]$ и $h[k, l]$ не связаны. Из нескольких полиномов $F(x)$ одной степени выбираем полином с максимальным значением допустимого запаздывания.

Процесс идентификации связан с автоматическим управлением объектом исследования, оборудованием для подачи тест-сигнала и сбора данных, обработкой данных. Это удобно осуществлять в специализированной среде программирования LabVIEW [5]. Разумно и подготовительную работу делать в той же среде. Автором был

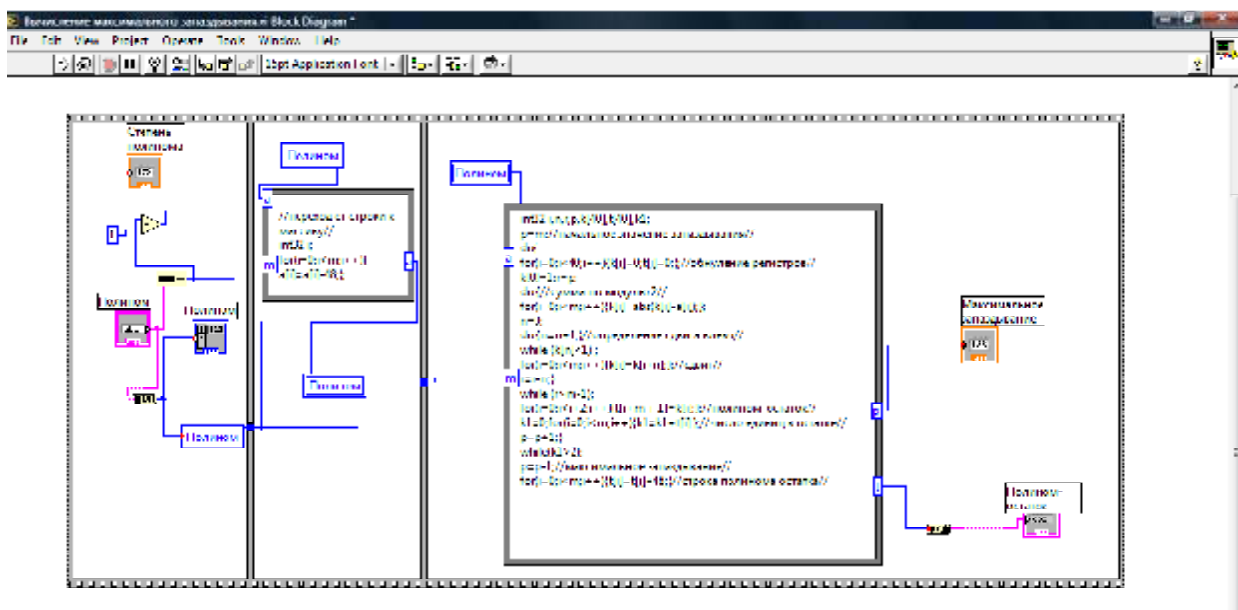


Рис. 2. Блок-схема виртуального прибора для определения максимального запаздывания М-последовательности.

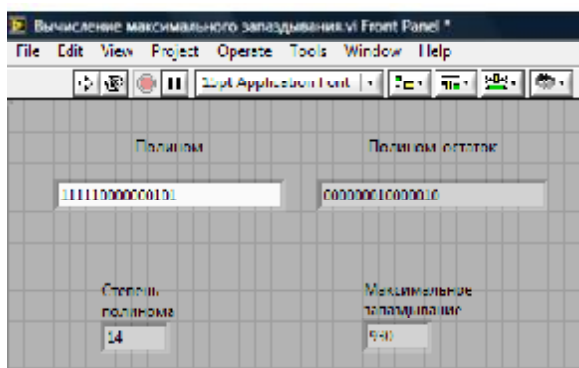


Рис. 3. Передняя панель виртуального прибора

области определения ядра первого порядка отличаются значительно, таким образом отбор характеристических полиномов M -последовательностей для синтеза эффективных композиционных тест-сигналов для идентификации нелинейных динамических объектов является обязательным.

ВЫВОДЫ

При заданной области определения ядра Вольтера второго порядка $h[k,l]$ в квадрате n - n максимально допустимые значения запаздывания тест-сигнала на базе двоичной M -последовательности (область определения ядра $h[j]$)

Таблица 1. Результаты расчета допустимого максимального запаздывания для некоторых характеристических полиномов

Коэффициенты полинома $F(x)$	Степень полинома $F(x)$	Период M -последовательности	Максимальное запаздывание
111000011	8	255	54
110101001	8	255	14
110001101	8	255	60
111110101	8	255	14
111100111	8	255	116
11100100001	10	1023	126
11011000001	10	1023	40
11010001001	10	1023	58
11110110001	10	1023	282
11100000000101	14	16383	1631
11010100000001	14	16383	578
111110100000001	14	16383	612
111110000000101	14	16383	930

разработан несложный виртуальный прибор для определения допустимого запаздывания в среде LabVIEW по изложенному выше алгоритму. На рис. 2 представлена блок-схема виртуального прибора, на рис. 3 – лицевая панель.

В окно “Полином” лицевой панели прибора вводятся в двоичном коде коэффициенты характеристического полинома, для $GF(2^n)$ это обычное представление $F(x)$. Запускается виртуальный прибор (рис.3), определяющий полином-остаток, максимально допустимое число ординат в $h[j]$ без смешивания оценок $h[j]$ и $h[k,l]$.

Результаты расчета для некоторых характеристических полиномов приведены в табл. 1, они подтверждают, что для различных характеристических полиномов одинаковой степени допустимые

сильно различаются для различных характеристических полиномов одинаковой степени n . Предложенные в статье алгоритм и программа позволяют отбирать характеристические полиномы M -последовательностей, приводящие к генерации тест-сигналов наименьшей длины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ikonen E.* Advanced process identification and control. New York: Marcel Dekker Inc., 2002. 316 p.
2. *Яковлев В.Ф.* Идентификация электрической дуги аппроксимирующими моделями. Алгоритмы и аппаратура//Математические методы исследования динамики и проблемы управления низкотемпературной плазмой. Новосибирск: Наука, 1991. с.175-244.
3. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
4. *Davies W.D.T.* System identification for self-adaptive control. New York: Wiley-Interscience, 1970. 290 p.
5. *Тревис Дж.* LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2005. 540 с.

CHOICE OF CHARACTERISTIC POLYNOMIAL OF BINARY M-SEQUENCE FOR NONLINEAR DYNAMIC OBJECT IDENTIFICATION

© 2011 V.F.Yakovlev

Samara State Technical University

The paper considers algorithm of choosing characteristic polynomial of a known power of binary M -sequence for generation of a test-signal for identification of nonlinear dynamic objects. The test-signal based on this M -sequence allows to measure separately maximum ordinates of Volterra first and second order kernels.

Keywords: Volterra kernels, test-signal, binary M -sequence.

Vadim Yakovlev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Theoretic Electrotechnology Department. E-mail: vf7415@mail.ru