

УДК 681.5.015

Определение оптимального периода квантования при идентификации объектов методом наименьших квадратов

В.В. Олоничев, Б.А. Староверов, М.А. Смирнов
ФГБОУВПО «Костромской государственной технологической университет», г. Кострома, Российская Федерация
E-mail: sba44@mail.ru, amt@kstu.edu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Метод наименьших квадратов является наиболее распространенным при параметрической идентификации объектов. Одним из самых значимых параметров, определяющих точность идентификации, является период квантования, в отношении выбора которого на сегодняшний день отсутствуют однозначные рекомендации. В связи с этим актуальной является проблема задания критерия, позволяющего определять оптимальный период дискретизации для идентификации объекта управления с точки зрения максимального правдоподобия.

Материалы и методы: С использованием методов вычислительного эксперимента осуществлена параметрическая идентификация объектов управления методом наименьших квадратов. Для идентификации и вычисления ковариационной матрицы использована научная библиотека GNU scientific library. Для определения параметров непрерывной передаточной функции использован математический пакет octave.

Результаты: Сформулирован критерий, позволяющий однозначно определять оптимальный период квантования для снятия экспериментальных данных, используемых для идентификации технологических установок методом наименьших квадратов.

Выводы: Параметры модели объекта, полученные методом наименьших квадратов, могут существенно отличаться от соответствующих параметров идентифицируемого объекта вследствие дискретности выходного сигнала объекта по уровню, обусловленной разрядностью аналого-цифрового регулятора, а также наличия в сигнале шумов. Данное расхождение будет минимальным, если для идентификации объекта использовать квант времени, при котором след ковариационной матрицы эксперимента минимален.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, метод наименьших квадратов, след ковариационной матрицы, микропроцессорная система адаптивного управления, период квантования.

Determining of the optimal time step for object identification by the least square technique

V.V. Olonichev, B.A. Staroverov, M.A. Smirnov
Kostroma State University of Technology, Kostroma, Russian Federation
E-mail: sba44@mail.ru, amt@kstu.edu.ru

Abstract

Background: The least squares method is the one most often used in parametrical identification. One of the most significant parameters affecting the identification accuracy is time step. However, there are still no definite recommendations on how to choose it. Therefore, it is now urgent to find a criterion that can determine the optimal time step for identifying the control object in terms of maximum likelihood.

Materials and Methods: In this work we used least squares parametrical identification and computer simulation. To identify and calculate the covariance matrix we employed the GNU scientific library and to determine the continuous transfer function parameters we applied the mathematical package Octave.

Results: We have found a criterion allowing us to determine the optimal time step for taking experimental data used to identify installations by the least square technique.

Conclusions: The parameters of the object model obtained by the least squares method can significantly differ from the parameters of the object being identified due to the output signal level discreteness caused by the analog-to-digital converter capacity and the noise in the signal. This difference is minimal if the time step used to identify the object corresponds to the minimum of the experiment covariant matrix trace.

Key words: parametrical identification, least squares method, covariance matrix trace, adaptive control microprocessor system, time step.

Одно из требований, предъявляемых к современным системам автоматического управления, заключается в том, что в каждом контуре управления должны быть реализованы схемы идентификации объекта управления для получения текущей структуры и текущей оценки параметров математической модели, адекватно

отображающей основные закономерности процессов, протекающих в объектах управления [1].

Наиболее универсальным и удобным с точки зрения вычислительной реализации способом получения математической модели динамического объекта управления является метод наименьших квадратов [2]. Если в качестве математической модели объекта использовать

разностную передаточную функцию, то данный метод сводится к классической задаче регрессионного анализа, которая хорошо разработана и широко используется при планировании экспериментов [3].

Но между матрицами эксперимента в первом и втором случае есть существенное различие. При планировании эксперимента уровни факторов можно задавать независимым друг от друга образом. А при динамической идентификации объекта управления матрица эксперимента формируется из последовательностей входного и выходного сигналов, снятых через равные интервалы времени со сдвигом в каждой последующей строчке [2], и выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} -y_{m-1} & -y_{m-2} & \dots & -y_0 \\ -y_m & -y_{m-1} & \dots & -y_1 \\ -y_{m+N-2} & -y_{m+N-3} & \dots & -y_{N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m-1} & u_{m-2} & \dots & u_0 \\ u_m & u_{m-1} & \dots & u_1 \\ u_{m+N-2} & u_{m+N-3} & \dots & u_{N-1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где m – порядок модели объекта; N – количество экспериментальных точек; y – значения на выходе идентифицируемого объекта; u – значения на входе идентифицируемого объекта.

Понятно, что в данном случае коэффициент корреляции между вычисленными параметрами модели достаточно высок, а сама матрица может быть плохо обусловленной. Проблема усугубляется тем, что экспериментальные данные содержат шумы и имеют квантование по уровню, так как в подавляющем большинстве случаев в ходе динамической идентификации экспериментальные данные можно завести в компьютер только через аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Поэтому важно сформировать матрицу эксперимента таким образом, чтобы минимизировать влияние данных факторов на точность получаемых результатов. Но, как уже было сказано выше, у нас нет возможности, варьируя уровнями независимых факторов, построить оптимальный план эксперимента. Но применить некоторые положения теории планирования эксперимента для задачи динамической идентификации объекта, а именно: определение оптимального периода квантования, используемого при снятии экспериментальных точек, составляющих матрицу эксперимента, вполне возможно.

Основная задача, которая решена в теории планирования эксперимента, – это формулирование критериев оптимальности планов и создание методики вычисления количественных оценок данных критериев. Основным критерий оптимальности, определяющий точность параметров модели, – это след ковариационной матрицы плана эксперимента [4]. Данный критерий

с успехом используется в задаче идентификации объекта методом наименьших квадратов в условиях временного дрейфа параметров в целях определения фактора забывчивости [5]. Однако при этом ограничиваются только уменьшением количества экспериментальных точек, упуская из виду другие параметры, определяющие матрицу эксперимента.

При динамической идентификации объекта возможно варьирование следующими параметрами:

- входной сигнал в функции времени;
- шаг по времени;
- порядок модели (количество столбцов);
- количество экспериментальных точек (количество строк).

Относительно входного сигнала имеется следующая рекомендация: он должен содержать достаточно богатый спектр [6]. При соблюдении данного требования отдельные строки матрицы не будут кратны между собой. Обычно в качестве входного сигнала используется случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне от 0 до 1 [2].

Порядок модели может быть определен на основании предварительных экспериментальных исследований или известен заранее, когда имеется теоретическая модель объекта, но не известны конкретные значения коэффициентов.

Что касается количества строк, то оно должно быть больше количества столбцов. Если параметры объекта не имеют временного дрейфа, то считается, что увеличение количества строк матрицы не критично.

Последние два параметра: количество строк и количество столбцов в матрице эксперимента, – могут быть легко изменены в ходе обработки экспериментальных данных. Что касается шага по времени, то обычно при его изменении приходится проводить новую серию экспериментов.

Проблема заключается в том, что на сегодняшний день отсутствуют четкие критерии для выбора шага квантования по времени. В научных изданиях по идентификации систем управления и цифровым адаптивным САУ изложены рекомендации по выбору приемлемого периода квантования исходя из временных и частотных характеристик технологической установки. В этих рекомендациях имеется в виду квант времени для цифрового регулятора, но использование регулятором цифровой модели объекта однозначно подразумевает получение данной модели с тем же шагом по времени. Следует отметить, что предложенные рекомендации не согласуются друг с другом и задают слишком широкий диапазон возможных значений кванта времени, например: от 0,01 до 0,05 постоянной времени объекта [6], менее 0,1 [7] и вплоть до 0,8 постоянной времени [8].

Следует учитывать, что при очень малом шаге дискретизации погрешности и шумы в из-

мерительном тракте от датчика до АЦП, а также погрешности от квантования по уровню в АЦП могут быть соизмеримы по величине с разностями выходных величин объекта в соседних точках, что приведет к плохой обусловленности матрицы параметров идентифицируемой технологической установки [2].

Поэтому задача определения оптимального значения периода квантования является наиболее важной, так как данный параметр является основным, влияющим на значения элементов матрицы эксперимента, обусловленные собственными движениями объекта.

В качестве гипотезы выдвинем предположение о том, что должно существовать такое значение кванта времени, определяемое в первую очередь параметрами самого объекта, при котором след ковариационной матрицы будет минимален, и, следовательно, будет минимальна сумма дисперсий коэффициентов разностной передаточной функции, получаемых в результате реализации метода наименьших квадратов и являющихся моделью объекта.

На первом этапе для выяснения целесообразности дальнейших исследований в данном направлении будем использовать метод вычислительного эксперимента. Функциональная схема виртуального стенда для проведения вычислительного эксперимента представлена на рис. 1.

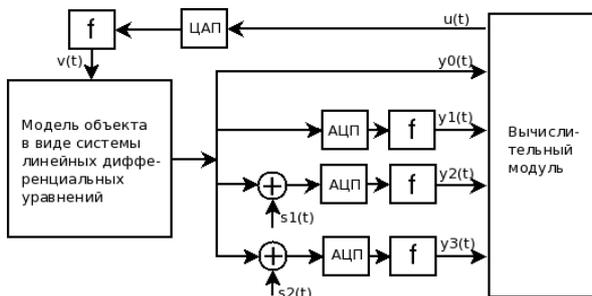


Рис. 1. Функциональная схема стенда для проведения вычислительного эксперимента

Модель объекта реализована в виде программы, осуществляющей интегрирование системы линейных дифференциальных уравнений статического объекта. Входная величина $u(t)$ формируется вычислительным модулем и является случайным числом, равномерно распределенным между 0 и 1 (функция `gsl_rng_uniform` из математической библиотеки `gsl` [9]). Для учета квантования по уровню $u(t)$ преобразуется в целое число в эмуляторе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а затем вновь преобразуется в число с плавающей точкой при помощи функционального блока «f» – в $v(t)$. Выход объекта перед подачей на вход «Вычислительного модуля» будем делить на 4 части:

- 1) $y_0(t)$ – точное значение;
- 2) $y_1(t)$ – точное значение + АЦП;

3) $y_2(t)$ – точное значение + малый шум + АЦП;

4) $y_3(t)$ – точное значение + умеренный шум + АЦП.

Эмулятор АЦП для учета квантования по уровню преобразует число с плавающей точкой в целое, а затем функциональный блок «f» из полученного целого числа восстанавливает число с плавающей точкой, точность представления которого определяется разрядностью АЦП. Шум от генератора случайных чисел с нормальным распределением и нулевым математическим ожиданием $s_1(t)$ и $s_2(t)$ получается при помощи функции `gsl_ran_gaussian` из математической библиотеки `gsl` [9].

Точное значение необходимо для верификации вычислительного модуля, который формирует матрицу эксперимента и методом наименьших квадратов вычисляет коэффициенты полиномов числителя и знаменателя разностной передаточной функции, являющейся искомой моделью объекта. Вид данной разностной передаточной функции представлен выражением [2]

$$\frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} \quad (2)$$

Для определения ковариационной матрицы, а также параметров разностной модели объекта используется также математическая библиотека `gsl`.

Для перехода от дискретной модели объекта к непрерывной используется математический пакет `octave` [10].

Непрерывная модель, по сравнению с дискретной, ближе к физической природе моделируемого объекта. Она позволяет определить корни характеристического уравнения – основные параметры, влияющие на динамику объекта. Также, имея непрерывную модель объекта, мы можем в дальнейшем использовать ее для поиска оптимальных настроек разнообразных регуляторов методами вычислительного эксперимента. При этом шаг интегрирования модели можно задавать достаточно малым для того, чтобы модель объекта выглядела как аналоговая для остальной части системы.

Вычислительный эксперимент проводился для четырех статических объектов, параметры которых представлены в табл. 1.

Эмулировался 14-разрядный АЦП и 12-разрядный ЦАП. Малый шум имеет дисперсию 0,25 %, а умеренный – 0,5 %. Для расчетов использовалось от 20 до 160 точек. Результаты представлены для 40 точек. В качестве кванта задавались следующие значения: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6, 2,8, 3,0, 5,0 и 8,0 с. Расчеты выполнялись на числах с плавающей точкой двойной точности. Часть полученных результатов представлена в табл. 2, где tr – это след ковариационной матрицы; s^2 – дисперсия.

Таблица 1. Параметры объектов, используемых в вычислительном эксперименте

Объект	I	II	III	IV
Корни характеристического уравнения	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	-0.380 -0.271	-3.168 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	-0.498 -0.380 -0.271
Передаточная функция	$\frac{0.783s+1.070}{s^2+0.232s+0.220}$	$\frac{0.504s+0.709}{s^2+0.651s+0.103}$	$\frac{0.360s^2+0.540s+0.780}{s^3+3.478s^2+1.107s+0.396}$	$\frac{0.382s^2+0.504s+0.709}{s^3+1.149s^2+0.427s+0.051}$

Таблица 2. Результаты обработки данных вычислительного эксперимента

Объект		I		II		III		IV		
Y0	tr	0.2	22.480	0.2	550.24	0.2	1.7732e+04	0.2	9.5686e+04	
		0.8	1.0776	1.0	8.0657	0.6	914.60	0.8	326.26	
		1.2	0.83659	2.0	4.7597	1.0	643.88	1.8	61.641	
		3.0	1.1889	3.0	6.3102	3.0	4.2956	3.0	234.24	
		8.0	0.77205	8.0	285.78	8.0	4.9057e+06	8.0	25938381	
	s ²	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	
		0.8	0.0	1.0	0.0	0.6	0.0	0.8	0.0	
		1.2	0.0	2.0	0.0	1.0	0.0	1.8	0.0	
		3.0	0.0	3.0	0.0	3.0	0.025179	3.0	0.0	
		8.0	1.6761	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	
	корни	0.2	-4.905 -0.100	0.2	-0.380 -0.271	0.2	-3.168 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	0.2	-0.498 -0.380 -0.271	
		0.8	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	1.0	-0.380 -0.271	0.6	-3.168 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	0.8	-0.498 -0.380 -0.271	
		1.2	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	2.0	-0.380 -0.271	1.0	-3.168 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	1.8	-0.498 -0.380 -0.271	
		3.0	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	3.0	-0.380 -0.271	3.0	-0.776 -0.179 + j0.418 -0.179 - j0.418	3.0	-0.498 -0.380 -0.271	
		8.0	-0.092 + j0.260 -0.092 - j0.260	8.0	-0.380 -0.271	8.0	-3.166 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	8.0	-0.498 -0.380 -0.271	
	Y1	tr	0.2	22.475	0.2	556.77	0.2	1.7449e+04	0.2	5.7249e+04
			0.8	1.0772	1.0	8.0638	0.6	914.47	0.8	328.15
			1.2	0.83629	2.0	4.7644	1.0	644.50	1.8	61.639
			3.0	1.1886	3.0	6.3166	3.0	4.2953	3.0	235.76
			8.0	0.77186	8.0	284.89	8.0	5.9900e+05	8.0	5.4347e+05
s ²		0.2	0.00244	0.2	2.015e-07	0.2	8.0044e-08	0.2	2.414e-06	
		0.8	1.165e-07	1.0	1.99e-07	0.6	3.1820e-08	0.8	1.604e-06	
		1.2	1.592e-07	2.0	1.750e-07	1.0	1.546e-08	1.8	5.275e-07	
		3.0	1.162e-06	3.0	2.41e-07	3.0	0.02519	3.0	7.088e-07	
		8.0	1.679	8.0	1.188e-06	8.0	1.896e-07	8.0	2.645e-06	
корни		0.2	-4.920 -0.101	0.2	-0.31 + j0.06 -0.31 - j0.06	0.2	-3.298 -0.157 + j0.310 -0.157 - j0.310	0.2	-6.59 0.02 + j0.23 0.02 - j0.23	
		0.8	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	1.0	-0.379 -0.272	0.6	-3.184 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	0.8	-0.55 -0.31 + j0.03 -0.31 - j0.03	
		1.2	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	2.0	-0.379 -0.272	1.0	-3.165 -0.155 + j0.318 -0.155 - j0.318	1.8	-0.523 -0.355 -0.279	
		3.0	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	3.0	-0.379 -0.271	3.0	-0.778 -0.179 + j0.418 -0.179 - j0.418	3.0	-0.546 -0.338 -0.285	
		8.0	-0.092 + j0.260 -0.092 - j0.260	8.0	-0.372 -0.274	8.0	-0.156 + j0.323 -0.156 - j0.323 -0.044	8.0	-0.28 + j0.04 -0.28 - j0.04 -0.035	

Y2	tr	0.2	21.367	0.2	413.03	0.2	6427.8	0.2	1070.9
		0.8	1.0808	1.0	8.2387	0.6	755.07	0.8	83.126
		1.2	0.83858	2.0	4.8858	1.0	525.72	1.8	39.862
		3.0	1.1875	3.0	6.4300	3.0	4.2799	3.0	129.28
		8.0	0.77260	8.0	234.29	8.0	8439.5	8.0	3184.8
	s ²	0.2	0.0028238	0.2	9.098e-05	0.2	2.4430e-05	0.2	1.393e-04
		0.8	6.1216e-04	1.0	3.956e-04	0.6	6.526e-05	0.8	0.00167
		1.2	4.9677e-04	2.0	3.367e-04	1.0	6.894e-05	1.8	0.00189
		3.0	1.7536e-04	3.0	2.596e-04	3.0	0.025476	3.0	0.00114
		8.0	1.6791	8.0	2.361e-04	8.0	3.130e-05	8.0	9.036e-04
	корни	0.2	-6.068 -0.094	0.2	-3.412 -0.025	0.2	-17.227 -0.827 + j0.924 -0.827 - j0.924	0.2	-8.960 2.266 -2.056
		0.8	-0.116 + j0.451 -0.116 - j0.451	1.0	-0.454 -0.234	0.6	-5.328 -0.147 + j0.303 -0.147 - j0.303	0.8	-1.35 -0.35 + j0.49 -0.35 - j0.49
		1.2	-0.116 + j0.453 -0.116 - j0.453	2.0	-0.427 -0.249	1.0	-2.018 -0.173 + j0.408 -0.173 - j0.408	1.8	-0.65 -0.22 + j0.40 -0.22 - j0.40
		3.0	-0.117 + j0.454 -0.117 - j0.454	3.0	-0.436 -0.250	3.0	-0.737 -0.177 + j0.420 -0.177 - j0.420	3.0	-1.212 -0.527 -0.113
		8.0	-0.092 + j0.259 -0.092 - j0.259	8.0	-0.562 -0.154	8.0	-0.158 + j0.318 -0.158 - j0.318 -0.115	8.0	-0.32 + j0.24 -0.32 - j0.24 -0.227
Y3	tr	0.2	23.101	0.2	426.82	0.2	1.0003e+04	0.2	1672.2
		0.8	1.0741	1.0	7.7565	0.6	1011.8	0.8	13.731
		1.2	0.83674	2.0	4.6428	1.0	737.84	1.8	65.823
		3.0	1.1871	3.0	6.1398	3.0	4.3446	3.0	228.68
		8.0	0.77190	8.0	251.81	8.0	3.0723e+04	8.0	8037.8
	s ²	0.2	0.0023297	0.2	5.136e-05	0.2	1.694e-05	0.2	8.119e-05
		0.8	2.1799e-04	1.0	1.860e-04	0.6	3.443e-05	0.8	0.00106
		1.2	2.0833e-04	2.0	1.429e-04	1.0	2.841e-05	1.8	9.376e-04
		3.0	5.6668e-05	3.0	1.054e-04	3.0	0.0249	3.0	5.151e-04
		8.0	1.6762	8.0	7.695e-05	8.0	7.726e-06	8.0	3.285e-04
	корни	0.2	-4.490 -0.104	0.2	-2.791 -0.038	0.2	-9.422 -2.868 0.014	0.2	-8.685 -0.49 + j1.92 -0.492 - j1.92
		0.8	-0.118 + j0.455 -0.118 - j0.455	1.0	-0.489 -0.230	0.6	-2.911 -0.161 + j0.313 -0.161 - j0.313	0.8	-1.624 -0.15861 + 0.45234i -0.15861 - 0.45234i
		1.2	-0.117 + j0.455 -0.117 - j0.455	2.0	-0.429 -0.252	1.0	-3.051 -0.153 + j0.316 -0.153 - j0.316	1.8	-1.308 -0.23 + j0.11 -0.23 - j0.11
		3.0	-0.116 + j0.454 -0.116 - j0.454	3.0	-0.421 -0.257	3.0	-0.768 -0.178 + j0.418 -0.178 - j0.418	3.0	-0.695 -0.10 + j0.23 -0.10 - j0.23
		8.0	-0.092 + j0.260 -0.092 - j0.260	8.0	-0.589 -0.254	8.0	-0.157 + j0.323 -0.157 - j0.323 -0.101	8.0	-0.41 + j3.99 -0.41 - j3.99 -0.795

На рис. 2–5 представлены переходные характеристики как самих исследуемых объектов, так и их моделей, полученные при различных периодах квантования.

На графиках (рис. 2–5) y_0 – данные с выхода исследуемых объектов; Y_0 , Y_1 , Y_2 и Y_3 – данные, полученные при помощи моделей объ-

ектов, параметры которых были определены на основе экспериментальных данных y_0 , y_1 , y_2 и y_3 , т.е. точных данных: данных, пропущенных через 14-разрядный АЦП, и данных, к которым перед АЦП был добавлен шум с нормальным распределением и с дисперсией 0,25 % и 0,5 %.

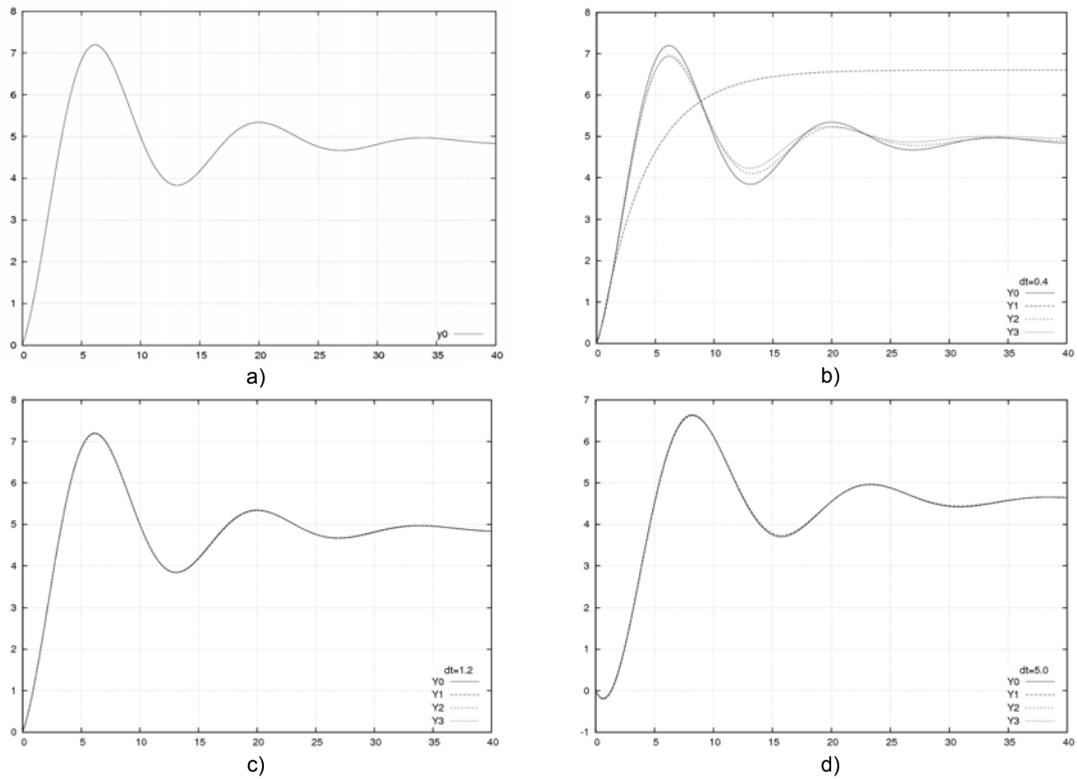


Рис. 2. Переходные характеристики объекта I

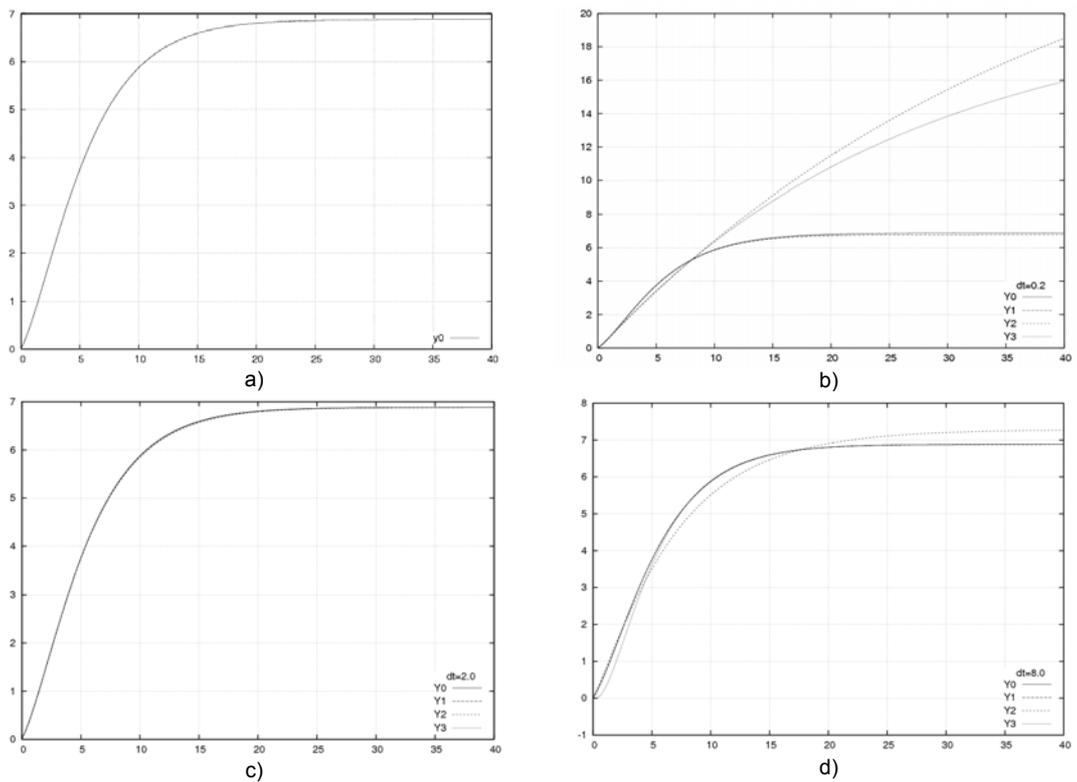


Рис. 3. Переходные характеристики объекта II

На рис. 2,с, 3,с, 4,с, и 5,с представлены переходные характеристики моделей, полученные с оптимальным квантом времени.

На рис. 2,б, 3,б, 4,б и 5,б представлены переходные характеристики моделей, полученные с квантом времени, меньшим оптимального. А на рис. 2,д, 3,д, 4,д и 5,д представлены переход-

ные характеристики моделей, полученные с квантом времени, большим оптимального.

Для сравнения на рис. 2,а, 3,а, 4,а и 5,а представлены переходные характеристики самих объектов.

Представленные графики наглядно демонстрируют, что переходные характеристики мо-

делей, полученные при оптимальном кванте времени, практически совпадают как между собой, так и с оригинальными переходными характеристиками объектов. В то время как переходные характеристики моделей, полученные при

значениях кванта времени, отличающихся как в большую, так и в меньшую стороны от оптимального, могут значительно отличаться от оригинала.

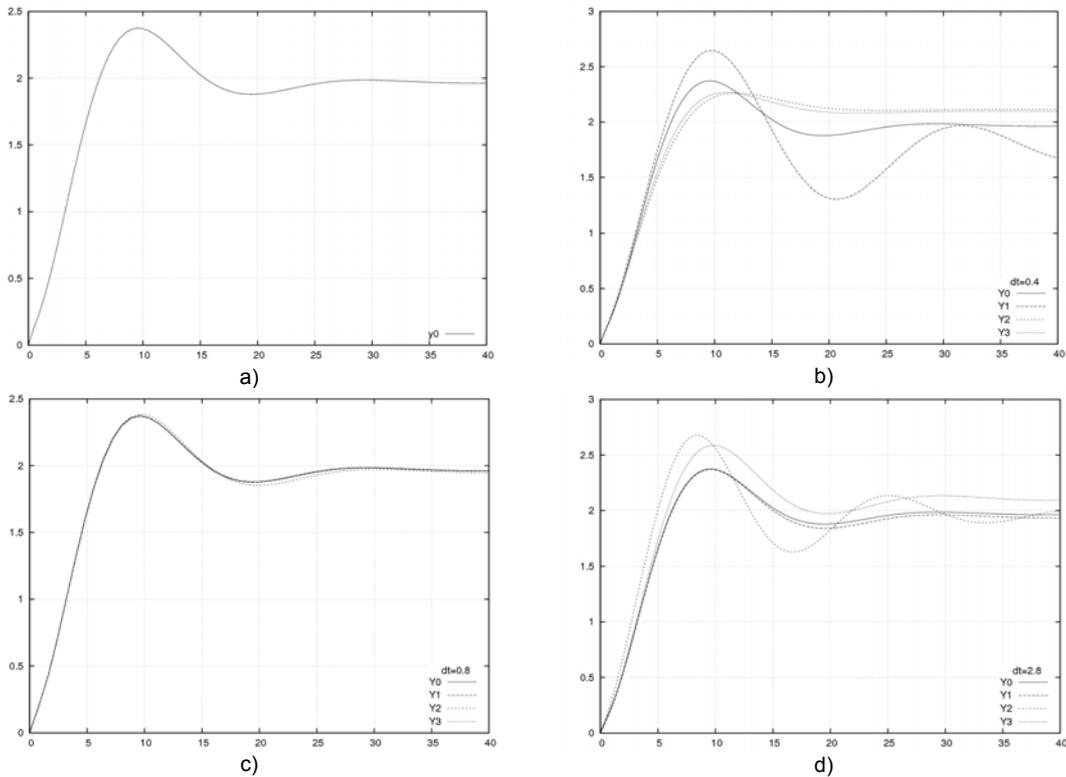


Рис. 4. Переходные характеристики объекта III

В случае, когда значения на выходе объекта в виде чисел с плавающей точкой двойной точности непосредственно используются для формирования матрицы эксперимента (не учитывается шум и квантование по уровню), при изменении кванта времени в достаточно широких пределах стабильно получаются параметры модели объекта управления, очень близкие к параметрам объекта.

При добавлении к выходу объекта шума с нормальным распределением и учете квантования по уровню, которое обусловлено АЦП, расчетные параметры модели могут существенно отличаться от параметров объекта, несмотря на малое значение среднеквадратичного отклонения расчетных значений от экспериментальных. Это говорит о том, что модель хорошо согласует-

ся с экспериментальными данными при заданном входном сигнале, а при использовании входного сигнала другого вида поведение модели будет существенно отличаться от поведения объекта, что подтверждается графиками (см. рис. 2,b, 3,b, 4,b и 5,b, а также рис. 2,d, 3,d, 4,d и 5,d).

Анализ данных, представленных в табл. 2, и рис. 2,с, 3,с, 4,с и 5,с показывает, что оптимальный период квантования соответствует минимуму следа ковариационной матрицы эксперимента.

Целевая функция (зависимость следа ковариационной матрицы от кванта времени) в целом имеет параболический вид. Но в то же время данная функция содержит нерегулярные сингулярные точки, в которых наблюдается скачкообразное уменьшение ее значения.

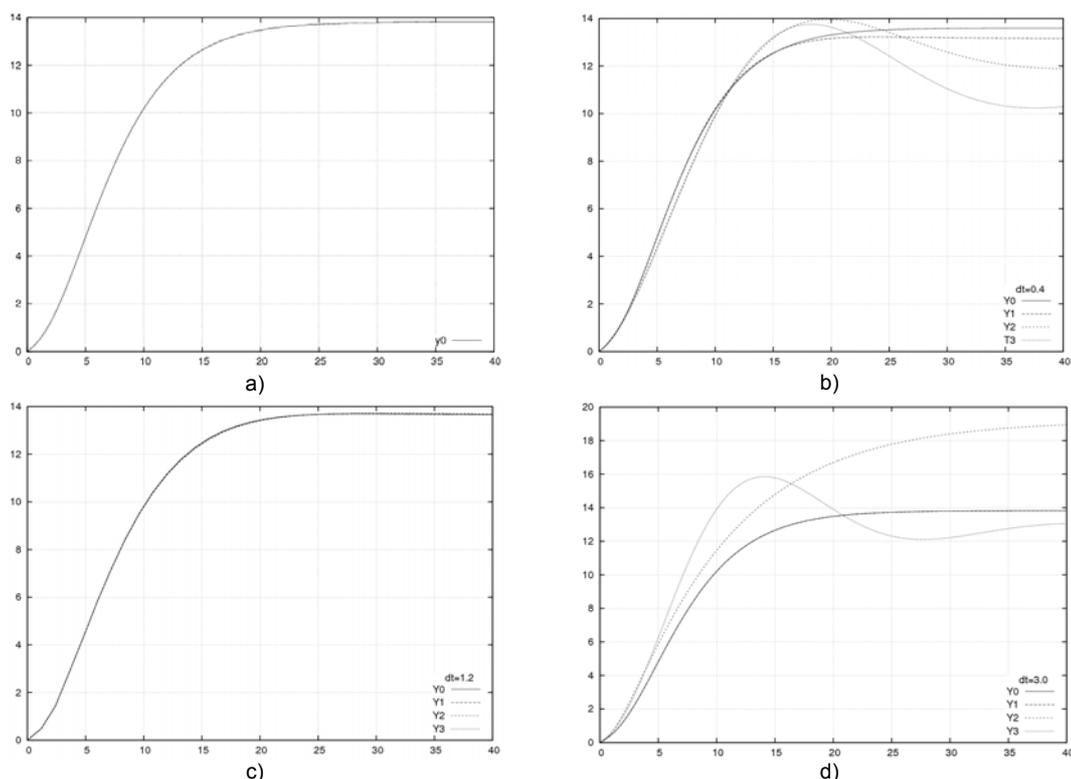


Рис. 5. Переходные характеристики объекта IV

Данные эксперимента показывают, что в точках сингулярности имеет место такое же скачкообразное увеличение среднеквадратичного отклонения расчетных значений выходной величины (выход модели) от экспериментальных данных (выход объекта). Это обстоятельство позволяет легко реализовать отсеивание данных точек при выборе оптимального периода квантования. Природа данной сингулярности, по-видимому, имеет чисто вычислительный характер – значения элементов в нескольких строчках матрицы эксперимента могут иметь значения, близкие к кратным.

В целом можно заключить, что полученные данные согласуются с выдвинутой гипотезой о том, что свойства матрицы эксперимента в значительной мере определяются характеристиками идентифицируемого объекта, и поэтому для каждого объекта существует такой период квантования, при котором его идентификация осуществляется наилучшим образом, и этот период соответствует минимуму следа ковариационной матрицы эксперимента.

В дальнейшем следует рассмотреть проблему определения порядка объекта и оптимального количества строчек матрицы эксперимента при идентификации объекта в реальном времени.

Список литературы

1. Раков В.А., Захарова О.В. О научной необходимости и технической целесообразности создания новых систем моделирования технических систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – № 2. – С. 7–23.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

3. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Metallurgiya, 1980. – 152 с.
4. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. – М.: Metallurgiya, 1982. – 752 с.
5. Spirada N.R., Fisher D.G. Improved least squares identification // International Journal of Control. – Vol. 46, issue 6. – P. 1889–1913.
6. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. – М.: Мир, 1987. – 480 с.
7. Kalman R.E. and J.E. Bertram. General Synthesis Procedure for Computer Control of Single-Loop and Multi-Loop Systems // AIEE Trans. – 1958. – 77. – Part 2.
8. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1983. – 245 с.
9. GNU Scientific Library [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gnu.org/software/gsl>
10. Octave [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://octave.sourceforge.net/>.

References

1. Rakov, V.A., Zakharova, O.V. O nauchnoy neobkhodimosti i tekhnicheskoy tselesoobraznosti sozdaniya novykh sistem modelirovaniya tekhnicheskikh sistem upravleniya [On scientific relevance and technical expedience of developing new systems of modeling computing control facilities]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, 2013, no 2, pp. 7–23.
2. Izerman, R. *Tsifrovyye sistemy upravleniya* [Digital control systems]. Moscow, Mir, 1984. 541 p.
3. Nalimov, V.V., Golikova, T.I. *Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta* [Logical basis of experiment design]. Moscow, Metallurgiya, 1980. 152 p.
4. Brodskiy, V.Z., Brodskiy, L.I., Golikova, T.I., Nikitina, E.P., Panchenko, L.A. *Tablitsy planov eksperimenta dlya faktornykh i polinomial'nykh modeley* [Experiment design tables for factor and polynomial models]. Moscow, Metallurgiya, 1982. 752 p.
5. Spirada, N.R., Fisher, D.G. Improved least squares identification. *International Journal of Control*, vol. 46, issue 6, pp. 1889–1913.
6. Ostrom, K., Vittenmark, B. *Sistemy upravleniya s EVM* [Computer controlled systems]. Moscow, Mir, 1987. 480 p.

7. Kalman, R.E., Bertram, J.E. General Synthesis Procedure for Computer Control of Single-Loop and Multi-Loop Systems. AIEE Trans, 1958, 77, part 2.

8. Grigor'ev, V.V., Drozdov, V.N., Lavrent'ev, V.V., Ushakov, A.V. *Sintez diskretnykh regulyatorov pri pomoshchi*

EVM [Computer-aided synthesis of discrete controllers]. Leningrad, Mashinostroenie, 1983. 245 p.

9. *GNU Scientific Library*. Available at: <http://www.gnu.org/software/gsl>.

10. *Octave*. Available at: <http://octave.sourceforge.net/>.

Староверов Борис Александрович,

ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматике и микропроцессорной техники,

e-mail: sba44@mail.ru

Олоничев Василий Вадимович,

ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике и микропроцессорной техники,

e-mail: basv0@mail.ru

Смирнов Максим Александрович,

ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике и микропроцессорной техники,

e-mail: amt@kstu.edu.ru