

КОНТРОЛЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ НАТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Л.Л. Прокофьева, С.П. Савич, А.Н. Порпулит

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: proklu@mail.ru

Рассмотрены особенности организации вычислительного процесса для класса натуральных имитаторов, реализованных на аналого-цифровом (гибридном) вычислителе. Показана эффективность использования в гибридных натуральных имитаторах аналогового процессора в качестве динамической модели объекта, что обусловлено высоким быстродействием вследствие распараллеливания и неалгоритмических вычислений в ходе моделирования динамики. Предложен подход к контролю вычислительного процесса при натурном моделировании, основанный на методах идентификации, и получены конструктивные выражения оценки функционирования вычислительно-управляющих систем гибридных натуральных имитаторов.

Ключевые слова: вычислительный процесс, натурные вычислительно-моделирующие системы, аналоговый процессор, цифровой процессор, оперативный контроль, оценка функционирования, методы идентификации.

Введение

В последние годы в теории и практике моделирования развивается новое направление по созданию средств моделирования, базирующееся на сочетании концепций физического и квазианалогового моделирования. Основной особенностью такого рода средств моделирования, называемых натурными вычислительно-моделирующими системами (НВМС), является наличие в их составе реального моделирующего объекта (базового), сходного по физическому характеру с моделируемым объектом, и системы управления (УС или, в более общем случае, вычислительной управляющей системы — ВУС), предназначенной для выработки (вычисления) таких управляющих воздействий базового объекта, которые обеспечивают его эквивалентность моделируемому объекту. Возможности подобного рода средств моделирования достаточно полно характеризуются примерами НВМС подвижных объектов (в частности, натуральных имитаторов), в качестве которых можно привести следующие:

- летающие самолетные имитаторы, в которых обеспечивается совпадение поведения базового и моделируемого самолетов в реальных полетных условиях, что позволяет решать задачи как исследовательского характера (например, отработка систем управления проектируемых или разрабатываемых самолетов), так и тренировки и обучения летного состава;

- динамически эквивалентные имитаторы надводных и подводных судов, а также сухопутных передвижных средств (например, автомобилей), создание которых позволяет в условиях, близких к реальным, организовать полигонное обучение и тренировку экипажей по управлению в разнообразных ситуациях (маневры в портах и на трассах судоходства, движение в тумане и др.);

■ исследовательские комплексы высокоточных электромеханических систем локации, при создании которых одной из основных задач является разработка системы управления и законов определения управляющих воздействий, обеспечивающих заданное качество процессов наведения (слежения).

Высокие точностные требования приводят к тому, что отработка законов управления, например, процессами локации возможна лишь путем создания на базе ЭВМ системы моделирования, включающей собственно электромеханический объект, что обеспечивает полный учет и анализ значимости всех факторов, оказывающих влияние на точность наведения. Подобного рода системы моделирования предназначены, в частности, для проведения исследований по оценке правильности конструктивных решений, качества процессов локации и параметров законов управления.

Практическая необходимость создания НВМС (в том числе НВМС подвижных объектов) заключается в получении инструмента, позволяющего как существенно повысить экономичность и качество исследований сложных систем, так и более качественно организовывать процессы обучения, тренировки и профессионального отбора обслуживающего персонала.

Очевидно, что в процессе натурального моделирования следует обеспечить достоверность вычисленных управлений моделирующего (базового) объекта динамике реального (моделируемого) объекта.

Цель работы

Получение адекватных оценок функционирования вычислительно-управляющей системы натуральных имитаторов, реализованной на основе аналого-цифрового вычислителя.

Основная часть

В общем случае построение ВУС НВМС возможно с применением различных средств вычислительной техники. При этом различны и стратегии организации контроля вычислений.

Особый интерес в данном случае представляет использование в качестве динамической модели объекта аналоговый процессор (суть — аналоговая вычислительная машина — АВМ), обеспечивающий высокое быстродействие вследствие неалгоритмического вычислительного процесса в ходе моделирования [1, 2]. Однако, необходимость учета производных высоких порядков [3], приводит к тому, что исполнение ВУС НВМС сложных динамических объектов в аналоговом виде практически невозможно. В то же время, построение ВУС на базе аналого-цифровых вычислительных комплексов или с включением в их состав, так называемых аналоговых подпрограмм [4 — 8], является достаточно перспективным. Укажем также на вариант НВМС, базовый объект которого содержит аналоговый вычислитель. Сказанное обуславливает важность контроля вычислений, выполняемых аналоговыми средствами.

Как указывается в [9], задача оперативного контроля аналогового процессора является одной из важных проблем аналоговой вычислительной техники. Попытка решить указанную проблему с использованием аналоговой техники приводит к методам контроля, которые, в основном, ориентированы на контроль исправности отдельных элементов и узлов АВМ [9, 10]. Для контроля и диагноза неисправностей АВМ находят применение метод *избыточных переменных* [11] который не всегда

является эффективным при контроле решения уравнений, описывающих динамику управляемых нелинейных объектов.

В гибридных вычислительных системах (ГВС) возможно использование цифрового процессора (т.е. цифровой вычислительной машины — ЦВМ) для контроля АВМ. При этом осуществляется как построение контрольных и диагностических тестов АВМ с помощью ЦВМ [12, 13], так и контроль в процессе решения уравнений динамики [14, 15].

В [16] излагается метод диагностики неисправностей аналоговых моделей, описываемых системой линейных ОДУ с постоянными коэффициентами. Метод основан на решении обратной задачи и сводится к определению матрицы правой части решаемой системы по полученному решению. Диагностика неисправностей осуществляется сравнением идентифицированной матрицы решаемой системы (для моделирующего объекта) с заданной матрицей (для реального объекта). Все операции по диагностике неисправностей выполняются на ЦВМ. Данная процедура диагностики основана на аппроксимации переходного процесса линейной комбинацией экспоненциальных функций. При диагностике моделей нелинейных объектов применение описанного подхода сталкивается со значительными трудностями.

Контроль аналоговой модели сравнением аналогового решения с решением, полученным на ЦВМ, достаточно распространен, однако обладает такими недостатками, как необходимость преодоления трудностей численного решения исходной задачи в полной постановке на ЦВМ, существенные затраты машинного времени, невозможность установления причин возникновения ошибок.

Контроль, если он осуществляется путем прямого измерения, всегда представляет собой некоторую обратную задачу, в частности, задачу *оценки параметров* объекта по его выходным и входным воздействиям. В таком случае имеется возможность привлечь различные методы идентификации [17], которые обладают значительными возможностями для решения задач контроля динамических систем [18], в том числе и аналоговых моделей.

В формализованном виде, контроль на основе методов *параметрической идентификации* осуществляется следующим образом. По наблюдаемым переменным объекта оцениваются параметры его математической модели. И уже по результату сравнения полученных оценок параметров с заданными значениями принимается решение о состоянии объекта.

Применим данный подход к оцениванию функционирования вычислительно-управляющей системы натуральных имитаторов, реализованной на основе аналого-цифрового вычислителя. Предположим, что существует система уравнений той же структуры, что и моделируемая, но с другими (в общем случае переменными) параметрами $q = (q_1, \dots, q_m)^T$:

$$z = f(z, u^*, q, t), z(t_0) = z_0, \quad (1)$$

где $z = y_u + \Delta y$ — вектор, описывающий контролируемый объект, и параметры которого (при отсутствии ошибок в реализации уравнений динамики) совпадают с параметрами моделируемой системы. Путем измерения или расчета соответствующих величин формируется информация о входных u^* и выходных z сигналах объекта контроля. Наблюдаемый вектор \bar{z} является в общем случае известной функцией векторов состояния z и управлений u^* . Если переменные непосредственно измеряются, то $\bar{z} = E_z + (v, u) = Eu^* + v$, где E — единичная матрица, v — аддитивный шум системы измерения. Шумы измерения зависят от точности «считывания» аналоговой информации или переменных в цифровой форме. В аналоговых моделях к

шумам измерения добавляются внутренние шумы самой модели. В системе измерения может производиться отделение сигнала от шумов, т.е. решаться задача фильтрации.

Результаты измерения предназначены для определения параметров математической модели (1), т.е. для проведения параметрической идентификации. По результатам, полученным с помощью идентификации, определяется по какому-либо критерию состояние объекта контроля. Для аналоговых моделей при обнаружении ошибки решается задача определения причины, вызвавшей ошибку, т.е. задача диагностики.

Использование средств аналоговой вычислительной техники для реализации контроля на основе идентификации приводит к большой избыточности оборудования, а точность оценок параметров при этом невысокая. В связи с этим методы контроля, ориентированные на применение ЦВМ, в частности, целесообразны при контроле аналоговых моделей в аналого-цифровых вычислительных комплексах (АЦВК). В этом случае по мере необходимости ЦВМ подключается к проверке аналоговой модели без вмешательства в ее работу.

Пусть объект контроля описывается уравнением

$$\dot{\psi} = f(z, u, q, t), \quad y(t_0) = y_0. \quad (2)$$

а модель, используемая при идентификации, имеет вид

$$\dot{z} = f(z, u, \hat{q}, t), \quad z(t_0) = z_0, \quad (3)$$

где $\hat{q} = (\hat{q}_1, \dots, \hat{q}_m)^T$ — вектор оценок параметров.

Обычно оценки параметров \hat{q} определяются из условия минимума квадратичного функционала. Если известно с точностью до оценок параметров \hat{q} аналитическое решение $z = \varphi(u, \hat{q}, t)$, то указанный функционал в матричной форме имеет вид

$$y(\hat{q}) = [b - A(\hat{q})]^T [b - A(\hat{q})], \quad (4)$$

где $b = [y(t_1), \dots, y(t_N)]^T$, $A(\hat{q}) = [\varphi(u, \hat{q}, t_1), \dots, \varphi(u, \hat{q}, t_N)]^T$.

Оценка \hat{q} вектора параметров q находится из условия

$$\frac{\partial y(\hat{q})}{\partial(\hat{q})} = \frac{\partial A(\hat{q})}{\partial(\hat{q})} [b - A(\hat{q})] = 0. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой систему нелинейных относительно \hat{q} алгебраических уравнений, решением которой является искомая оценка вектора параметров q .

Определение оценок параметров $\hat{q}_i, i = \overline{1, m}$ из условия близости выходов объекта и модели, заданной в виде дифференциальных уравнений, приводит к нелинейным процедурам оценивания даже в том случае, когда модель объекта линейна по параметрам (из-за нелинейной зависимости решения от параметров).

Выводы

Получены аналитические выражения для определения оценок функционирования вычислительно-управляющей системы натуральных имитаторов, реализованной на основе аналого-цифрового вычислителя. Вычислительная процедура определения оценок

основана на методах параметрической идентификации и не требует прямых измерений векторов состояний натурной модели (имитатора) реального (моделируемого) объекта.

Однако, в ряде практических случаев, аналитическое решение сложных дифференциальных уравнений получить затруднительно (или, даже, невозможно) и для определения переменных z следует привлекать численные методы, что значительно усложняет процедуру идентификации.

Литература

1. Смоллов, В.Б. Аналоговые вычислительные машины / В.Б. Смоллов. — М.: Высшая школа, 1992. — 408 с.
2. Садчиков, П.И. Вычислительные устройства и системы / П. И. Садчиков, Ю. В. Шаповалов. — М.: Высшая школа, 1988. — 237 с.
3. Гноенский, Л.С. Математические основы теории управляемых систем / Л.С. Гноенский, Г.А. Каменский, Л.Э. Эльсгольд. — М.: Физматгиз, 1969. — 512 с.
4. Беки, Дж. Теория применения гибридных вычислительных систем / Дж. Беки, У. Карплюс. — М.: Мир, 1970. — 484 с.
5. Таненбаум, Э.С. Архитектура компьютера / Э.С. Таненбаум. — СПб.: Питер, 2007. — 848с.
6. Бройдо, В.Л. Архитектура ЭВМ и систем / В.Л. Бройдо, О.П. Ильина. — СПб.: Питер, 2009. — 720 с.
7. Новиков, Ю.В. Функциональные модули контрольно-измерительных систем / Ю.В. Новиков // Микропроцессорные средства и системы. — 1990.— №3.— С. 75 — 77.
8. Баррет, С.Ф. Встраиваемые системы / С.Ф. Баррет, Д. Дж. Пак. — М.: ДМК - пресс, 2007. — 640 с.
9. Бердяков, Г.И. Методы контроля аналоговых вычислительных машин / Г.И. Бердяков, И.М. Витенберг. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
10. Силаева, Т.А. Обеспечение надежного функционирования ЭВМ и систем / Т.А. Силаева. — М.: МАИ, 1993. — 146 с.
11. Мироновский, Л.А. О качестве контроля АВМ при использовании метода избыточных переменных / Л.А. Мироновский // Вопросы радиоэлектроники. — 1989. — Вып. 4. — С. 47 — 55.
12. Согомонян, Е.С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е.С. Согомонян, Е.В. Слабоков. — М.: Радио и Связь, 1989. — 208 с.
13. Курочкин, Ю.А. Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем / Ю.А. Курочкин, А.С. Смирнов, В.А. Степанов. — СПб.: Питер, 1993. — 317 с.
14. Burrage, K. Numerical Methods for Second-Order Stochastic Differential Equations / K. Burrage, I. Lenane, G. Lythe // SIAM Journal on Scientific Computing. — 2007. — Vol. 29. — №. 1. — P. 245 – 264.
15. Kang, G. Efficient Implementation Techniques for Gracefully Degradable Multiprocessor Systems / G. Kang // IEEE Trans, on Contr. — 1995. — Vol. 44. — №. 4. — P. 503 — 517.
16. Верлань, А.Ф. Вычислительные процессы в системах управления и моделирования / А.Ф. Верлань, И.Е. Ефимов, А.В. Латышев. — Л.: Судостроение, 1989. — 244 с.
17. Мокін, Б.І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем / Б.І. Мокін, В.Б. Мокін, О.Б. Мокін. — Вінниця: ВНТУ, 2010. — 260 с.
18. Евланов, Л. Г. Контроль динамических систем / Л.Г. Евланов — М.: Наука, 2009. — 431 с.

КОНТРОЛЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДАМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИ НАТУРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

Л. Л. Прокоф'єва, С. П. Савіч, А. Н. Порпуліт

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко 1, Одесса 65044, Украина; e-mail:

Розглянуто особливості організації обчислювального процесу для класу натурних імітаторів, реалізованих на аналого-цифровому (гібридному) обчислювачі. Показано ефективність використання в гібридних натурних імітаторах аналогового процесору в якості динамічної моделі об'єкта, що обумовлено високою швидкістю внаслідок розпаралелювання та неалгоритмічних обчислень в ході моделювання динаміки. Запропоновано підхід до контролю за обчислювальним процесом при натурному моделюванні, заснований на методах ідентифікації та отримано конструктивні вирази оцінювання функціонування обчислювально-управляючих систем гібридних імітаторів.

Ключові слова: обчислювальний процес, натурні обчислювально-моделюючі системи, аналоговий процесор, цифровий процесор, оперативний контроль, оцінка функціонування, методи ідентифікації.

CONTROL OF CALCULABLE PROCESSES BY METHODS OF AUTHENTICATION AT MODEL DESIGN

L. L. Prokofieva, S. P. Savich, A. N. Porpulis

Odessa national polytechnic university,
1 Shevchenko Ave., Odessa 65044, Ukraine; e-mail:

The features of organization of calculable process for the class of the model imitators realized on an analog-digital (hybrid) calculator are considered. Efficiency of the use in the hybrid model imitators of analog processor as the dynamic model of object is shown, that is conditioned by the high fast-acting because of parallel and unalgorithmic calculations during the design of dynamics. Offered approach to the control of calculable process at the model design, based on the methods of authentication and structural expressions of estimation of functioning of the sensor-based systems of hybrid model imitators are got.

Keywords: calculable process, model calculable-designing systems, analog processor, digital processor, operative control, estimation of functioning, methods of authentication.