
УДК 681.58

Ю. В. Котенко, П. И. Кравец, канд. техн. наук
Национальный технический университет Украины «КПИ»
(Украина, 03056, Киев, ул. Политехническая, 41, корп. 18, каф. АУТС, к. 522
тел.: (+38044) 2418646,
E-mail: kotenko@aust.ntu-kpi.kiev.ua, kravets@aust.ntu-kpi.kiev.ua)

Проектирование элементов систем управления, реализуемых на программируемых логических интегральных схемах в среде MatLab

Рассмотрена среда проектирования физически реализуемых на программируемых логических интегральных схемах моделей элементов систем управления. Приведен пример реализации в этой среде наблюдающего устройства.

Розглянуто середовище проектування моделей елементів систем управління, що фізично реалізуються на програмованих логічних інтегральних схемах. Наведено приклад реалізації в цьому середовищі спостерігаючого пристрою.

К л ю ч е в ы е с л о в а: программируемые логические интегральные схемы, теория автоматического управления, моделирование, MatLab.

Как известно, большинство современных систем управления (СУ) проектируют и строят на основе классической теории автоматического управления с применением ставших уже классическими микроконтроллеров с последовательной обработкой данных [1]. Однако в последние годы для управления сложными многомерными динамическими объектами все чаще используются системы, синтезируемые на основе современной теории автоматического управления, теориях робастных и интеллектуальных СУ [2]. Как правило, такие СУ ориентированы на решение сложных оптимизационных задач с прогнозированием, адаптацией и оцениванием пространства состояний объекта управления, использование алгоритмов и элементов реализуемых на основе теорий размытых множеств и нечеткой логики, нейронных сетей. Для функционирования таких систем необходимо обрабатывать значительный массив данных одного временного среза в реальном времени и в темпе, соответствующем функционированию объекта, не внося при этом недопустимых задержек в процесс формирования управляющих воздействий, что возможно лишь при очень высоком быстродействии управляющих устройств. Очень часто единственным спо-

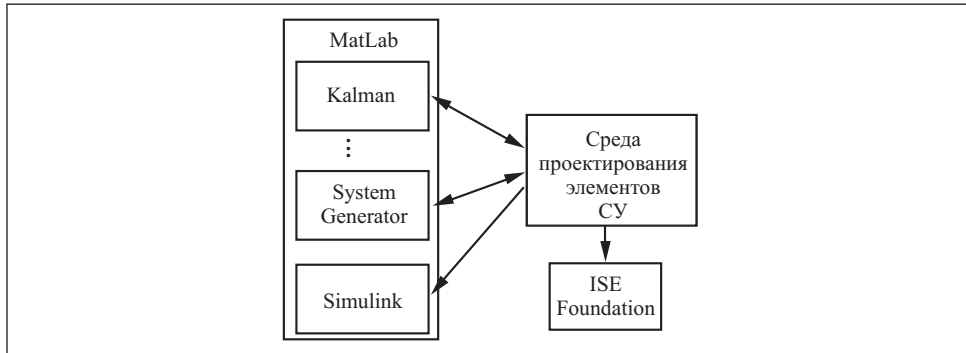


Рис. 1

собом обеспечения требуемого быстродействия является использование нескольких вычислителей и распараллеливание вычислительных задач между ними, что, естественно, приводит к усложнению и удорожанию управляющих устройств.

С появлением недорогих быстродействующих программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) сверхвысокой интеграции, способных выполнять параллельную обработку данных, специалисты в области управления все чаще рассматривают их как серьезную альтернативу традиционным вычислителям с последовательным алгоритмом работы. Программируемые логические интегральные схемы позволяют на аппаратном уровне строить вычислительные элементы и структуры для решения задач, которым свойствен природный параллелизм (в СУ это многомерные регуляторы, оценка пространства состояний объекта, нейровычисления, обработка лингвистической информации и др.).

В настоящее время применение ПЛИС для решения задач теории автоматического управления ограничено в связи со сложностью разработки программного обеспечения, требующей от разработчика определенного уровня знаний САПР ПЛИС, языка описания архитектуры VHDL/Verilog, HDL-имитатора и др.

Для моделирования и реализации СУ на традиционных вычислителях существует большое число различных оболочек и CASE-сред [3]. В то же время, для моделирования и реализации элементов и СУ с вычислителями на ПЛИС программные среды такого уровня пока не разработаны. Поэтому для специалистов в области систем автоматического управления создание такой среды, не требующей глубоких знаний САПР ПЛИС и VHDL/Verilog, является достаточно актуальным.

Рассмотрим один из возможных вариантов решения этой проблемы объединив возможности существующих программных сред MatLab и САПР ПЛИС.

Разработанная среда проектирования представляет собой программу, функционирующую в среде MatLab и объединяющую функциональные возможности MatLab и библиотеки System Generator [4]. Среда позволяет по исходным данным синтезировать структуру и определять параметры программной модели элемента СУ и генерировать модели в виде параллельной вычислительной структуры на элементах библиотеки System Generator. Полученные модели элементов используются в Simulink для моделирования систем и для генерирования файла списка связей (NetList), используемого САПР ПЛИС для создания файла прошивки ПЛИС.

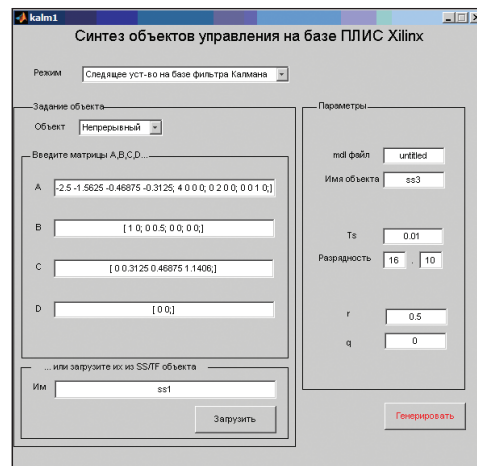


Рис. 2

Схема взаимодействия среды проектирования с библиотеками, функциями MatLab и САПР ПЛИС представлена на рис. 1, а программная оболочка в виде диалогового окна — на рис. 2.

Процесс проектирования элементов СУ состоит из четырех этапов.

На первом этапе из списка выбирается элемент СУ, который необходимо спроектировать, и вводятся исходные данные.

На втором этапе с использованием функции MatLab синтезируются описание структуры (уравнения, матрицы и др.) и параметры модели.

На третьем этапе происходит преобразование описания структуры модели, полученной на втором этапе, в структуру, построенную с использованием библиотеки System Generator.

На четвертом этапе в эту структуру подставляются синтезированные на втором этапе параметры модели.

Порядок функционирования и использования среды рассмотрим на примере построения наблюдающего устройства (НУ) на основе фильтра Калмана. Пусть имеется дискретный объект управления (ОУ), модель которого представим в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n) + \mathbf{F}\mathbf{w}(n), \\ \mathbf{y}_v(n+1) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + \mathbf{D}\mathbf{u}(n) + \mathbf{H}\mathbf{w}(n) + \mathbf{v}(n), \end{aligned} \tag{1}$$

с известными входами $\mathbf{u}(n)$, возмущениями на входах $\mathbf{w}(n)$ и выходах $\mathbf{v}(n)$. Будем полагать, что векторы $\mathbf{w}(n)$ и $\mathbf{v}(n)$ имеют нормальный закон распределения с математическими ожиданиями, $E\{\mathbf{w}(n)\} = 0$, $E\{\mathbf{v}(n)\} = 0$ и кова-

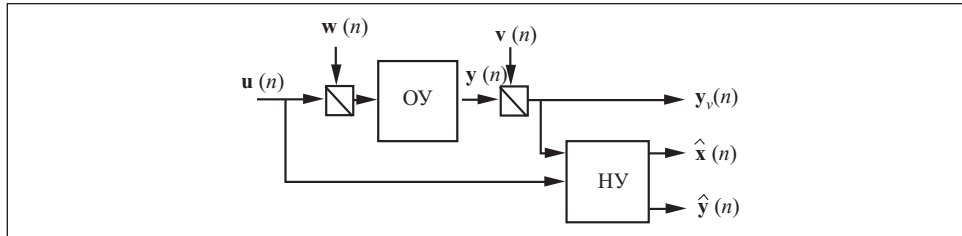


Рис. 3

риационными матрицами соответственно $\mathbf{W}\delta_{ij} = E\{\mathbf{w}(i), \mathbf{w}^T(j)\}$ и $\mathbf{V}\delta_{ij} = E\{\mathbf{v}(i), \mathbf{v}^T(j)\}$. Вектор состояния $\mathbf{x}(n)$ не поддается точному измерению, поэтому оценочные значения его компонент $\hat{\mathbf{x}}(n)$ приходится восстанавливать по известным входам $\mathbf{u}(n)$ измеряемым координатам системы $\mathbf{y}_v(n)$, искаженным помехой [4].

На рис. 3 представлена структурная схема фрагмента СУ данного объекта с НУ на основе фильтра Калмана. Этот фрагмент описывается уравнением

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n) + \mathbf{L}(\mathbf{y}_v(n) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(n) - \mathbf{D}\mathbf{u}(n)),$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(n+1) \\ \hat{\mathbf{y}}(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{M}\mathbf{C}) \\ \mathbf{I} - \mathbf{M}\mathbf{C} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(n) + \begin{bmatrix} (\mathbf{I} - \mathbf{C}\mathbf{D})\mathbf{D} & \mathbf{C}\mathbf{M} \\ -\mathbf{M}\mathbf{D} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(n) \\ \mathbf{y}_v(n) \end{bmatrix},$$
(2)

из которого матрица коэффициентов обратных связей \mathbf{L} и новая матрица коэффициентов обратных связей \mathbf{M} определяются на основе решения матричного алгебраического уравнения Риккати [5].

Допустим, требуется синтезировать НУ на основе фильтра Калмана для объекта четвертого порядка заданного передаточной функцией:

$$W = \frac{p^2 + 3p + 7,3}{0,8p^4 + 2p^3 + 5p^2 + 3p + 2}.$$
(3)

Используя диалоговое окно (см. рис. 2), вводим в среду проектирования параметры модели ОУ (3), параметры возмущений r, q , время дискретизации T_s , разрядность данных — 16 бит (6 бит для целой части и 10 бит для дробной части). После этого встроенная функция «kalman» синтезирует матрицы $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{L}$ и \mathbf{M} (2). Далее, используя значения полученных коэффициентов этих матриц и уравнения (2), а также соответствующие элементы из среды System Generator, среда генерирует структуру (рис. 4), которая представляет собой модель НУ на основе фильтра Калмана, функционирующую в среде MatLab,

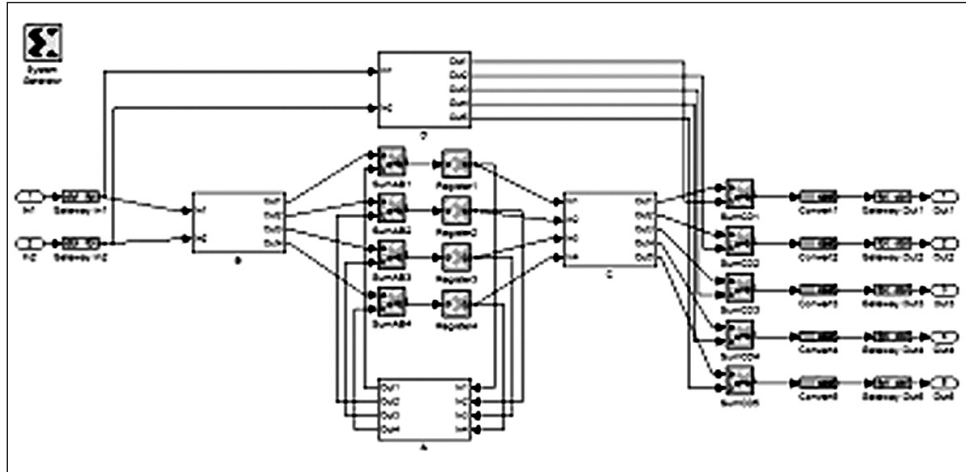


Рис. 4

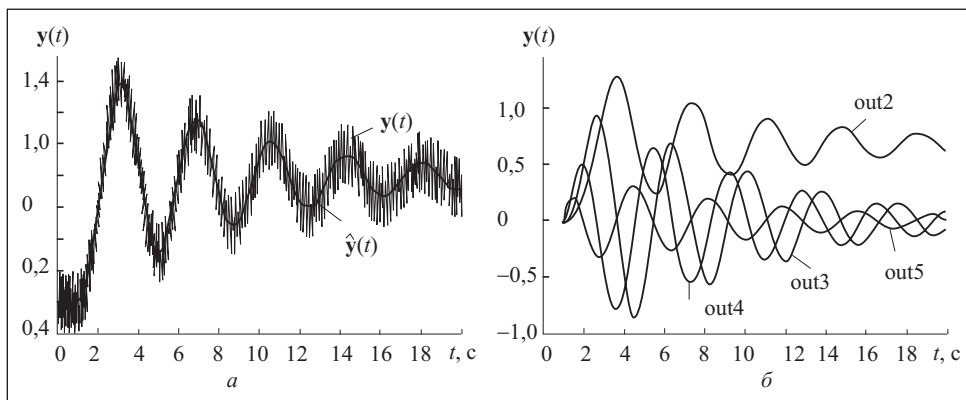


Рис. 5

и одновременно является моделью физически реализуемого на ПЛИС НУ на основе фильтра Калмана.

В дальнейшем синтезированная модель НУ (см. рис. 4) в виде блока-подсистемы «sss3» может быть использована для моделирования СУ с НУ на основе фильтра Калмана в Simulink и для получения конфигурационной последовательности ПЛИС фирмы Xilinx.

Результаты моделирования СУ с НУ представлены в виде осциллограмм, отображающих зашумленный $y_v(t)$ и измеренный $\hat{y}_v(t)$ с помощью НУ выходные сигналы ОУ (рис. 5, а) и наблюдаемые с помощью НУ переменные состояния объекта управления (рис 5, б).

Генерирование конфигурационной последовательности ПЛИС осуществляется средствами САПР (в данном случае Xilinx Foundation ISE 6.3i) на основании списка связей полученного ранее System Generator.

Результаты синтеза НУ для кристалла Spartan3xc3s1000-5fg320 следующие:

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| Число используемых слайсов | 3146 из 7680 (40 %) |
| Тактовый период (частота) | 39,397 нс (25,38 МГц) |

Таким образом, предложенные в работе подход и среда проектирования позволяют решить значительную часть проблем, связанных с разработкой программных моделей элементов СУ, адаптированных к среде Simulink. Эти программные модели могут быть использованы как в среде Simulink, так и для физической реализации на ПЛИС. В настоящее время, кроме описанного в НУ на основе фильтра Калмана, разработаны и опробованы пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор с фильтрацией в канале обратной связи, прямые и инверсные модели различных ОУ, в том числе и нейросетевые модели ОУ [6].

A design medium of the models of the control system elements physically realized on the programmed logical integral circuits. An example of the detecting device realization in this medium is given.

1. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. — М. : Энергия, 1973. — 440 с.
2. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления. Ч. I /Под ред. Колесникова А. А. — Таганрог : изд. ТРТУ, 2000. — 407 с.
3. Деменков Н. П. SCADA-системы как инструмент проектирования АСУ ТП — М. : изд. МГТУ им. Баумана, 2004. — 328 с.
4. Xilinx System Generator version. 2.1. Reference Guide. 2002. — 148 с.
5. Романенко В. Д., Игнатенко Б. В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ. — Киев : Выща школа, 1990. — 334 с.
6. Котенко Ю. В. Среда проектирования элементов систем управления, реализуемых на ПЛИС// Сб. тр. конф. «Моделирование 2006» — Киев : изд. ИМПЭ НАН Украины, 2006. — С. 273—275.

Поступила 18.07.06;
после доработки 26.01.07

КОТЕНКО Юрий Валериевич, мл. науч. сотр. лаборатории АСУ ТП НИИ информационных процессов Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 2002 г. Область научных исследований — интеллектуальные системы управления.

КРАВЕЦ Петр Иванович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории АСУ ТП НИИ информационных процессов Национального технического университета Украины «КПИ». В 1972 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — системы управления, интеллектуальные системы управления.