

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ПРОЕКТИРОВЩИКА ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ КОМАНДНЫХ ПРИБОРОВ

Р. И. Сольнищев^а, доктор техн. наук, профессор

А. И. Каримов^а, аспирант

Т. И. Каримов^а, аспирант

Д. Н. Бутусов^а, канд. техн. наук, ассистент

А. Р. Мкртычян^б, генеральный директор, главный конструктор

Д. О. Якимовский^б, канд. техн. наук, начальник отделения, главный конструктор по направлению

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

^бАО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время повсеместно повышаются требования к объектам проектирования в сочетании с сокращением сроков их разработки. Однако для проектирования электронных блоков командных приборов применяется методика, основанная на последовательном маршруте проектирования, приводящая к дефектам, увеличению сроков и цены разработки, особенно на наиболее ответственном раннем этапе проектирования. В то же время все большее распространение получает подход модельного проектирования (*model-based design*), свободный от этих недостатков. Наиболее часто модельное проектирование применяется при создании встраиваемых систем реального времени, к которым относятся цифровые регуляторы командных приборов. **Цель:** разработка структуры, формирование аппаратных и программных блоков автоматизированного рабочего места проектировщика цифровых регуляторов командных приборов, позволяющего снизить количество дефектов, стоимость и сроки разработки за счет применения модельного проектирования. **Результаты:** разработана структура автоматизированного рабочего места проектировщика цифровых регуляторов командных приборов с применением программно-аппаратных средств *National Instruments*. Особенностью предложенного автоматизированного рабочего места является возможность его развертывания с минимальными затратами времени и трудовых ресурсов. Для рабочего места адаптированы методы параллельной декомпозиции звеньев передаточных функций для реализации цифровых регуляторов на базовых матричных кристаллах и программируемых логических интегральных схемах, позволяющие реализовывать регуляторы с параллельной архитектурой, а также алгоритмы построения цифровых регуляторов на базе дельта-оператора, которые обеспечивают возможность синтеза регуляторов при жестких ограничениях на разрядность вычислительного устройства и период дискретизации, производить параметрическую оптимизацию цифровых регуляторов командных приборов. **Практическая значимость:** разработанное автоматизированное рабочее место позволит повысить производительность труда проектировщика цифровых регуляторов командных приборов, качество получаемых регуляторов и приборов в целом.

Ключевые слова — автоматизированное рабочее место, цифровые регуляторы, командные приборы, синтез, базовые матричные кристаллы.

Введение

Комплекс командных приборов предназначен для навигации и управления движением летательных аппаратов [1] и включает в себя гиросtabilизированные платформы, акселерометры, гироскопы и другие приборы.

При проектировании командных приборов основным критерием является точность. Она достигается применением систем стабилизации, коррекции, приведения. В настоящее время и в перспективе в качестве регуляторов в этих системах внедряются цифровые регуляторы, которые обладают известными преимуществами перед аналоговыми.

Проектирование цифровых регуляторов связано с решением целого ряда сложных задач идентификации, синтеза, анализа объектов проектирования, обработки сигналов и др. [2]. Решение

этих задач невозможно без применения средств автоматизированного проектирования, в качестве которых предлагается автоматизированное рабочее место для проектирования цифровых регуляторов командных приборов (АРМ ЦР КП).

Структура АРМ ЦР КП

В мировой инженерной практике все большее значение приобретает модельное проектирование (*model-based design*) — подход, при котором на всех стадиях проектирования используется единая среда разработки и тестирования, а применяемые при проектировании модели являются одновременно и спецификацией объектов проектирования [3]. Особенно эффективно модельное проектирование при создании встраиваемых систем реального времени. Цифровые регуляторы командных приборов относятся именно к этому

классу устройств, и к их разработке целесообразно адаптировать методы модельного проектирования.

Особенности проектирования цифровых регуляторов командных приборов отражаются в аппаратной части, программном комплексе и соответствующих базах данных предлагаемого автоматизированного рабочего места. Применение программно-аппаратного комплекса National Instruments позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к рабочему месту, как то: гибкость и надежность алгоритмов и оборудования, простота настройки и эксплуатации. Отличительной особенностью АРМ ЦР КП является возможность получать проектные решения в короткие сроки, так как не требуется настройка интерфейсов и драйверов; разработчикам предоставляется богатая палитра готовых программных и аппаратных модулей среды NI LabVIEW для решения задач синтеза, идентификации, оптимизации. По своей идеологии предлагаемое автоматизированное рабочее место наиболее полно соответствует принципам модельного проектирования.

Особо следует отметить эффективность такого рабочего места на этапах испытаний в сочетании со штатной контрольно-измерительной аппаратурой и динамическими моделирующими стендами [2].

Структура АРМ ЦР КП (рис. 1) разработана на основе программного обеспечения National Instruments LabVIEW и устройств CompactRIO-9012, PXI-7833R, баз данных математических моделей командных приборов, методов и алгоритмов, критериев, статистических данных архивов.

С помощью АРМ ЦР КП возможно решение следующих задач проектирования командных приборов:

- 1) синтез цифровых регуляторов систем стабилизации, межрамочной коррекции, приведения;
- 2) математическое моделирование командных приборов;
- 3) анализ устойчивости и качества систем стабилизации, межрамочной коррекции;
- 4) анализ точностных характеристик комплекса командных приборов;
- 5) полунаатурное моделирование командных приборов со встроенными микропроцессорами, программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС), базовыми матричными кристаллами;
- 6) проведение испытаний комплекса командных приборов совместно с контрольно-измерительной аппаратурой;
- 7) идентификация объектов управления и отдельных блоков командных приборов.

Создание математической модели регулятора является наиболее ответственным из этапов про-



■ Рис. 1. Структурная схема АРМ

ектирования. Также крайне важным является обеспечение адекватности работы итогового цифрового регулятора исходной математической модели, для чего в процесс проектирования вводятся этапы идентификации полученного промежуточного проектного решения с петлями обратных связей, что реализует принятую при модельном проектировании парадигму.

Для ускорения процесса идентификации средствами АРМ ЦР КП на начальных этапах («прошивка» целевого микропроцессорного устройства) в структуру АРМ вводится контрольно-измерительная аппаратура, обеспечивающая отладку и тестирование цифровых регуляторов.

В процессе разработки АРМ ЦР КП, наряду со стандартными алгоритмами, были применены специальные методы, не входящие в набор алгоритмов, предоставляемых модулями расширения среды National Instruments LabVIEW. Так, алгоритмы синтеза передаточной функции цифрового корректирующего устройства для систем стабилизации и коррекции строились с использованием дельта-оператора [3, 4] либо по методу полиномиальных уравнений [5]. Для реализации на ПЛИС или базовых матричных кристаллах как устройствах, позволяющих формировать параллельную архитектуру вычислителя, приме-

нялись алгоритмы синтеза регуляторов с параллельной структурой [6, 7].

Синтез регулятора производился по следующему алгоритму.

1. Синтез структуры цифрового регулятора.

2. Разложение передаточной функции регулятора на простейшие дроби для уменьшения влияния шумов округления при расчете динамических характеристик системы и проведения параметрической оптимизации за счет распараллеливания алгоритма [7, 8].

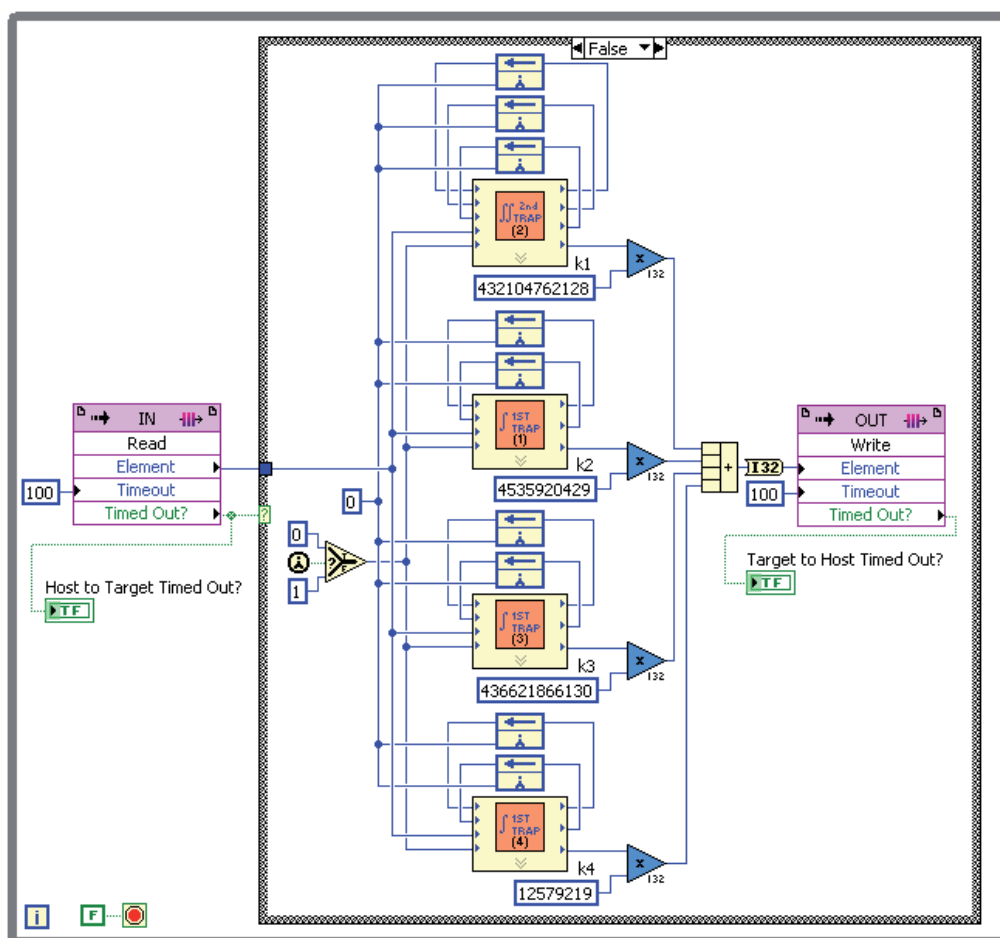
Программирование ПЛИС, на которой реализуется цифровой регулятор, осуществляется напрямую из среды LabVIEW, что значительно упрощает прототипирование. На рис. 2 представлена модель регулятора с фиксированной точкой (32-битное знаковое число), непосредственно предназначенная для создания «прошивки» ПЛИС, которая в дальнейшем тестировалась в составе системы стабилизации. Исполняемый код LabVIEW можно использовать как спецификацию по созданию HDL-моделей при проектировании программ на базовых матричных кристаллах, которые применяются в серийных изделиях.

Применение АРМ для стендовых испытаний ЦР КП

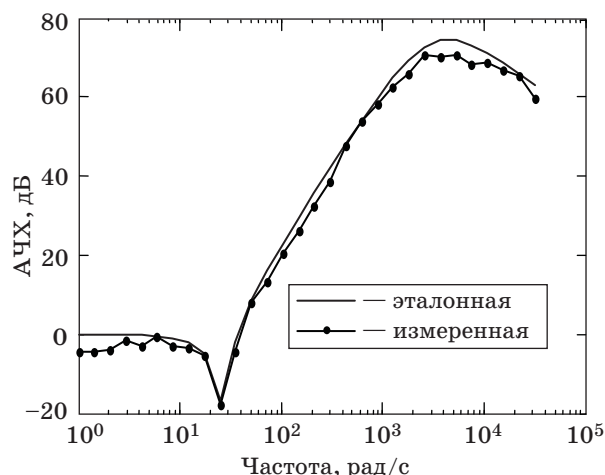
Применение АРМ ЦР КП для стендовых испытаний рассмотрим на примере частотного анализа цифрового регулятора системы стабилизации гиросtabilизатора.

Обычно для снятия частотных характеристик систем на вход устройства подают гармонические сигналы с заранее известным спектром и измеряют соответствующие выходные сигналы. В LabVIEW входит специализированный модуль System Identification Toolbox, позволяющий решать эту задачу.

Созданная в среде LabVIEW с использованием аппаратной платформы NI PXI-7833R, подпрограмма стендовых испытаний цифрового регулятора представляет собой набор виртуальных приборов (VI), снимающих амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазочастотную характеристику электронного блока с цифровым регулятором, подключенного к стенду, и реакцию на ступенчатое воздействие. Разработанное АРМ ЦР КП позволяет проектировщику сначала про-



■ Рис. 2. Модель цифрового регулятора с фиксированной точкой, предназначенная для программирования ПЛИС



■ **Рис. 3.** АЧХ цифрового корректирующего контура, снятой с ПЛИС, встроенной в систему стабилизации гиросtabilизатора

тестировать модель электронного блока с учетом квантования, помех и других факторов, а затем произвести тестирование регулятора в составе реальной аппаратуры с тем, чтобы:

1) оценить близость модели регулятора к соответствующему ей реальному блоку;

2) в случае несовпадения модели регулятора и реальной аппаратуры скорректировать модель, найти и устранить неисправность блока.

Блоки АРМ ЦР КП для частотного анализа были применены при проектировании цифрового регулятора гиросtabilизатора. На рис. 3 представлен фрагмент работы АРМ при снятии АЧХ.

Литература

1. Александров Ю. С. и др. Прецизионный комплекс командных приборов инерциальной системы управления разгонным блоком «Бриз-М» на базе гироскопов с газостатическим подвесом / Ю. С. Александров, В. П. Арефьев, О. А. Артемьев, М. А. Виноградов, В. А. Зелинский, В. М. Костырев, С. Г. Кучерков, А. М. Смирнов, А. В. Сорокин // Гироскопия и навигация. 2000. № 4. С. 5–10.
2. Сольников Р. И. Основы автоматизации проектирования гиросистем. — М.: Высш. шк., 1985. — 240 с.
3. Сольников Р. И., Каримов А. И., Каримов Т. И., Бутусов Д. Н. Проектирование цифровых регуляторов с применением дельта-оператора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С. 25–30.
4. Karimov A. I., Karimov T. I. Dynamic SYSTEM SIMULATION using Delta Operator in LabVIEW Environment // Proc. of IEEE Control and Communications Intern. Siberian Conf. (SIBCON-2015), Omsk, 21–23 May 2015. Omsk, 2015. P. 1–4.

Заключение

Предложенное АРМ ЦР является эффективным инструментом проектировщика командных приборов с цифровыми регуляторами как автономного применения, так и в составе других средств автоматизации проектирования комплекса командных приборов. Предварительные оценки практического применения АРМ ЦР КП показали, что за счет уменьшения сроков начальных этапов проектирования, отладки и настройки цифровых регуляторов командных приборов на дальнейших этапах, особенно этапе испытаний, сроки проектирования цифрового электронного блока уменьшаются значительно при достижении требуемых характеристик качества.

Описанное АРМ ЦР КП строится на базе программно-аппаратных решений компании National Instruments, сочетающей в себе гибкость, надежность и малые сроки развертывания. На АРМ ЦР КП реализованы перспективные алгоритмы синтеза цифровых регуляторов, позволяющие реализовывать регуляторы при жестких ограничениях на период дискретизации и длину машинного слова, что типично для регуляторов командных приборов (например, длина машинного слова 16 бит и период дискретизации $T = 10^{-4}$ с). Рассмотренное АРМ ЦР КП является существенным фактором повышения конкурентоспособности продукции предприятия, осуществляющего внедрение автоматизированного рабочего места, на отечественном и мировом рынке в условиях импортозамещения.

5. Волгин Л. Н. Элементы теории управляющих машин. — М.: Сов. радио, 1962. — 163 с.
6. Andreev V. S., Butusov D. N., Karimov A. I., Karimov T. I. Automated Design of Digital Systems with Parallel Architecture // Proc. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. IEEE NW Russia, Saint-Petersburg, 2–4 Feb. 2015. Saint-Petersburg, 2015. P. 46–48.
7. Андреев В. С., Малютин М. О., Каримов А. И., Каримов Т. И. Комплекс программных средств автоматизации проектирования цифровых систем с параллельной архитектурой // NI Days: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19–20 ноября 2014 г. М., 2014. С. 116–118.
8. Vishal V., Kumar V., Rana K. P. S., Mishra P. Comparative Study of Some Optimization Techniques Applied to DC Motor Control // Advance Computing Conference (IACC): proc. of 2014 IEEE Intern. Conf., Allahabad, India, 21–22 Feb. 2014. Allahabad, 2014. P. 1342–1347.

UDC 621-05

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.66

Automated Workplace for a Designer of Digital Controllers for Command Devices

Solnitsev R. I.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, remira70@mail.ru

Karimov A. I.^a, Post-Graduate Student, art.krmv@gmail.com

Karimov T. I.^a, Post-Graduate Student, carimus@gmail.com

Butusov D. N.^a, PhD, Tech., Assistant Professor, butusovdn@mail.ru

Mkrtychyan A. R.^b, General Manager, info@niikp.spb.ru

Yakimovsky D. O.^b, PhD, Tech., Head of Department, info@niikp.spb.ru

^aSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bCommand Devices Research Institute Corporation, 16, Tramvainyi Pr., 198216, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: At the date, the requirements to designed object are commonly increasing as well as design terms are reducing. However, the method is used, based on a serial design route, is in use for command devices digital controllers design, leading to errors, longer terms and higher costs of the design, especially on the most valuable, early design stage. At the same time, a model-based design being free from these disadvantages becomes wide spread. The use of the model-based design is especially common for real-time embedded systems development, to which command devices digital controllers refer to. **Results:** A structure of automated workplace for command devices digital controllers design with the use of National Instruments firmware. A specific feature of the proposed workplace is an ability to deploy it with minimum time and labor costs. Parallel decomposition methods for transfer function sections of digital controllers on uncommitted logic arrays and programmable logic devices are adapted, allowing to implement controllers with parallel architecture, as well as algorithms of delta-operator based digital controllers design, which allow to develop controllers when strong restrictions on a computational device word length and the sampling period and parametrically optimize command devices digital controllers. **Practical relevance:** The developed automated workplace will allow increasing command devices digital controllers designers' labor productivity (according to preliminary estimates, about two times), increase the developed controllers quality and devices on the whole.

Keywords — Automated Workplace, Digital Controllers, Command Devices, Design, Uncommitted Logic Arrays.

References

1. Aleksandrov Yu. S., Arefiev V. P., Artemiev O. A., Vinogradov M. A., Zelinsky V. A., Kostyrev V. M., Kucherkov S. G., Smirnov A. M., Sorokin A. V. The Precision Complex of Command Devices of the Inertial Control System for “Briz-M” Booster on the Basis of Gyro Devices with the Gas-static Support. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2000, no. 4, pp. 5–10 (In Russian).
2. Solnitsev R. I. *Osnovy avtomatizatsii proektirovaniia giro-sistem* [Basics of Gyro-systems Design Automation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 240 p. (In Russian).
3. Solnitsev R. I., Karimov A. I., Karimov T. I., Butusov D. N. Digital Controllers Design using Delta-operator. *Izvestiia SPbGETU “LETI”*, 2015, no. 9, pp. 25–30 (In Russian).
4. Karimov A. I., Karimov T. I. Dynamic System Simulation using Delta Operator in LabVIEW Environment. *Proc. IEEE Control and Communications Intern. Siberian Conf. (SIBCON-2015)*, Omsk, 21–23 May 2015, pp. 1–4.
5. Volgin L. N. *Elementy teorii upravliaiushchikh mashin* [Elements of Control Machines Theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1962. 163 p. (In Russian).
6. Andreev V. S., Butusov D. N., Karimov A. I., Karimov T. I. Automated Design of Digital Systems with Parallel Architecture. *Proc. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.*, IEEE NW Russia, Saint-Petersburg, 2–4 February 2015, pp. 46–48.
7. Andreev V. S., Malyutin M. O., Karimov A. I., Karimov T. I. Software Complex for Digital Systems with Parallel Architecture Automated Design. *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “NI Days”* [Proc. of XIII Intern. Conf. “IN Days”], Moscow, 19–20 November 2014, pp. 116–118 (In Russian).
8. Vishal V., Kumar V., Rana K.P.S., Mishra P. Comparative Study of Some Optimization Techniques Applied to DC Motor Control. *Proc. of 2014 IEEE Intern. Conf. “Advance Computing Conference” (IACC)*, Allahabad, India, 21–22 February, 2014, pp. 1342–1347.