$$T_{R1} = T_{i,j+1} \cdot \cos(\varphi_1),\ T'_{i,j+1} = T_{R1}. \quad (13)$$

Далее найдем угол между векторами $\overrightarrow{R1}_{L1next}$ и $\overrightarrow{R2}_{L1next}$ по формуле $\cos(\varphi_2) = l_{\bar{e}LR1}$ [3].

Составим квадратное уравнение по правилу параллелограмма относительно T_{R2}:

$$\left(T_{i,j+1}\right)^2 = \left(T_{R1}\right)^2 + \left(T_{R2}\right)^2 + 2 \cdot \left(T_{R1}\right) \cdot \left(T_{R2}\right) \cdot \cos(\varphi_2) \quad (14)$$

и, решив его для положительного значения T_{R2}, найдем величину натяжения в ванте:

$$T_{R2} = -T_{R1} \cdot \cos(\varphi_2) + \left(\left(T_{R1} \cdot \cos(\varphi_2)\right)^2 - T_{R1}{}^2 + \left(T_{i,j+1}\right)^2\right)^{1/2}. \quad (15)$$

После выполнения шага 7 следует переход на новый круг (если $j < m - 1$, то $j = j + 1$; если $j = m - 1$, то $i = i + 1$ и $j = 1$).

В конце работы алгоритма на выходе получаем массивы данных:

– $[P_2]$ – координаты узлов периферийного шнура;

– $[T]$ – величины натяжений в участках периферийного шнура.

В результате построения получим геометрическое место узлов периферийного шнура, а также величины натяжений в каждом участке периферийного шнура.

Данный алгоритм был использован при написании макросов на процедурном языке APDL конечно-элементного комплекса ANSYS. Построенная конечно-элементная модель фронтальной сети рассматриваемого сетчатого рефлектора получила предварительное натяжение в соответствии с заданными и расчетными требованиями. Затем был проведен поиск равновесного состояния, в результате которого путем варьирования параметров была получена напряженная модель фронтальной сети, оптимизированная с необходимой точностью усилий натяжения в шнурах.

Применение разработанного авторами статьи алгоритма позволяет с использованием простых методов оптимизации (например метод Хука–Дживса) получить конечные величины усилий в шнурах формообразующей структуры рефлектора. Рассмотрение алгоритма оптимизации построения периферийного шнура будет проведено в следующих работах авторов.

Библиографические ссылки

1. Голдобин Н. Н. Особенности проектирования формообразующей структуры крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Молодежь. Техника. Космос : Тр. VI Общерос. молодежной науч.-практ. конф. / БГТУ «Военмех». СПб., 2014.
2. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. М. : Высш. шк., 1966.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1986.

References

1. Goldobin N. N. [Features of designing of network structure of a large transformed reflector of a spacecraft]. *Trudy VI Obshcheros. molodezhnoy nauch.-praktich. konfer. “Molodezh'. Tekhnika. Kosmos”* [Proc. VI National Youth Scientific-practical. Conf. BGTU “Voyenmekh” “Youth. Tech. Space”]. St. Petersburg, 2014. (In Russ.)
2. Yablonskiy A. A. *Kurs teorericheskoy mekhaniki* [Theoretical mechanics course]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1966.
3. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i ychashikhsya VTYZov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1986.

© Голдобин Н. Н., Тестоедов Н. А., 2014

УДК 658.512.001.56

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЯ И ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Ковалев[1], Ю. О. Кикоть[2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru
[2]Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82
E-mail: awa@yandex.ru

Представлен обзор основных технических решений по улучшению точности и надежности системы контроля испытаний и имитации невесомости для космических аппаратов. Рассмотрен ряд проблем на этапе проектирования системы имитации невесомости, связанных как со сложностью конструкции, так и с тем, что система должна работать с дорогостоящими космическими аппаратами. Показано, что с этой целью

осуществляется полный контроль на всех стадиях разработки и запуска системы. Многоуровневое управление и контроль системы имитации невесомости обеспечивают бесперебойную работу всей системы путем резервирования наиболее важных элементов, а также выполняют все функции управления и контроля параметров процесса как в автоматическом, так и ручном режиме.

Ключевые слова: система имитации невесомости, контроль испытаний, управление, надежность, резервирование, автоматизация.

ON THE QUESTION OF IMPROVING THE ACCURACY AND RELIABILITY OF SYSTEM TESTING AND SIMULATION OF WEIGHTLESSNESS IN SPACE

I. V. Kovalev[1], Y. O. Kikot[2]

[1] Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru
[2]Sibirsky State Technological University
82, Mira pr., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: awa@yandex.ru

An overview of the main technical solutions for improving the accuracy and reliability of control systems testing and simulation of weightlessness in space is presented. The issues at the design stage of the system simulate weightlessness associated with the design complexity and the fact that the system should work with expensive spacecraft are discussed. It is shown that with this purpose the complete control at all stages of development and launch of the system is done. Multi-level governance and control system simulation of weightlessness ensures the smooth operation of the entire system by reserving the most important elements, as well as performs all the functions of management and control of process parameters, in both automatic and manual mode.

Keywords: simulation of weightlessness, obespechivaya, reliability, redundancy, automation.

Система имитации невесомости может найти применение в различных областях промышленности, прежде всего, авиационной и ракетно-космической. В частности, система относится к испытательной технике, наземным испытаниям механизмов, имеющих гибкую, многозвенную конструкцию, рассчитанную на работу в невесомости [1].

Подобные конструкции (складные панели солнечных батарей космических аппаратов, раскрываемые многозвенные конструкции и т. п.) необходимо равномерно обезвешивать, прилагая усилие к каждому звену конструкции, в процессе перемещения этих звеньев относительно друг друга. Система имитации невесомости может быть использована для обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций и устранения деформаций или разрушений под действием силы тяжести при наземных испытаниях (экспериментального уточнения или идентификации параметров математической модели конструкции механизмов на Земле) или при физической отработке и поверке работы системы управления трансформируемыми конструкциями на Земле для проведения лётных испытаний. Отличительной особенностью технологического процесса раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций является то, что первоначально, когда конструкция находится в сложенном положении, точки приложения усилий обезвешивания расположены компактно, а затем, по мере раскрытия и приведения в рабочее состояние эти точки удаляются друг от друга, и каждая по самостоятельной траектории проходит своё расстояние [2].

С учетом вышеизложенного создана универсальная система имитации невесомости, состоящая из блока управления на основе компьютера и микроконтроллера и необходимого количества модулей, установленных один над другим. Она отличается тем, что каждый модуль включает в себя два сервопривода, расположенных с его торцевой части, шкивы которых работают на общий зубчатый ремень, а на нем через пассивные шкивы крепится каретка, перемещающаяся по оси *X* по направляющим, и тележка, закрепленная на общем зубчатом ремне и перемещающаяся по оси *Y* по собственной направляющей, причём на тележке имеется шкив, через который проходит гибкая связь, соединяющая подвешенный через блоки компенсирующий груз с обезвешиваемым элементом. Также на тележке имеется датчик-инклинометр, определяющий вертикальное положение гибкой связи, по сигналам с которого блок управления включает сервоприводы устройства и перемещает каретку и тележку, поддерживая вертикальность гибкой связи по отношению к объекту обезвешивания. Количество модулей и размеры каждого модуля подбираются исходя из геометрии и необходимого числа точек приложения усилия обезвешивания применительно к конкретному объекту [3].

Автоматизированный блок управления работает следующим образом. Система управления формирует

алгоритм одновременной работы сервоприводов модуля так, что имеется возможность:

– перемещать каретку синхронным разнонаправленным вращением шкивов сервоприводов;

– перемещать тележку синхронным однонаправленным вращением шкивов сервоприводов;

– выполнять одновременное движение каретки и тележки при включении одного из сервоприводов либо при вращении шкивов сервоприводов с разной скоростью; таким образом, два привода, компактно расположенные с торца модуля, позволяют осуществлять одновременное позиционирование тележки и каретки модуля.

На этапе проектирования системы имитации невесомости возникает ряд проблем, связанных как со сложностью конструкции, так и с тем, что данная система должна работать с дорогостоящими космическими аппаратами. С этой целью осуществляется полный контроль на всех стадиях разработки и запуска системы имитации невесомости, а также проводятся необходимые испытания, что является особенно важной стадией, когда даже малейшая неточность полученных результатов может повлечь грубые ошибки и неправильную работу всего оборудования в целом, что недопустимо при производстве космических аппаратов.

Существенную роль в процессе создания конкурентоспособной продукции и отыскания наиболее эффективных путей ее реализации играет уровень надежности, так как непредвиденный отказ системы имитации невесомости в процессе использования может привести к катастрофическим последствиям, а также нанесёт серьезный моральный ущерб фирме-изготовителю и подорвет доверие к ней.

В силу этого необходимо создавать разветвленную сеть технического обслуживания и аварийного ремонта с соответствующей информационной системой, добиваясь максимального удовлетворения разнообразных запросов потребителя. Чем выше гарантированный изготовителем уровень надежности системы имитации невесомости, тем, при прочих равных условиях, большей конкурентоспособностью она будет обладать.

Для этого необходимо проанализировать возможные причины отказа работы системы имитации невесомости:

– ошибка рабочего, оператора (человеческий фактор);

– отсутствие синхронизации поступающих параметров и данных;

– смещение траектории перемещения каретки или ее рабочих органов, определяющих точность функционирования или другие показатели работоспособности;

– смещения (линейные, угловые) отдельных элементов системы имитации невесомости в результате силовых или температурных деформаций, включая результаты вибрационных процессов;

– временные запаздывания для сил, давлений, крутящих моментов, передаваемой мощности и других характеристик динамической нагруженности системы;

– изменения в процессе функционирования системы имитации невесомости показателей ее эффективности, таких как производительность, КПД и др.;

– превышение уровня любых установленных показателей – шума, вибрации и других специальных характеристик [4].

Для защиты системы имитации невесомости от вышеперечисленных отказов необходимо повысить ее точность и надежность за счет введения резервированной системы автоматического управления. Это позволит создать высокоэффективную систему, в которой элементы и сама система имитации невесомости будут обладать высокими показателями надежности, достаточными для практически безотказной эксплуатации.

Предлагается разработка 4-уровневой системы управления и контроля системы имитации невесомости, которая обеспечивает бесперебойную работу всей системы путем резервирования наиболее важных частей и участков, а также выполняет все функции управления и контроля параметров процесса как в автоматическом, так и ручном режиме.

На первом уровне организован сбор данных и параметров с датчиков и исполнительных механизмов с унифицированным токовым сигналом 4–20 мА и HART-протоколом.

На втором уровне сигналы с датчиков и исполнительных механизмов поступают на станцию удаленного ввода/ вывода Mitsubishi Electric MELSEC STlite, благодаря которой CPU контроллера находится в центральном пункте (блок управления), периферия работает децентрализовано на месте, что позволяет сократить расстояние монтажа от датчиков до модулей ввода/вывода, а также STlite отличается высоким уровнем модульности и конструкцией, адаптированной к полевым шинам, поэтому она идеально соответствует требованиям современных распределенных систем. Устройство оптимизировано для эффективной связи на уровне процесса с масштабируемой производительностью и высокой степенью интеграции, что особенно необходимо для высокого уровня надежной работы системы имитации невесомости.

Основные особенности MELSEC STlite:

– область возможного применения фактически не ограничена;

– сводит к минимуму издержки на системное и аппаратное обеспечение;

– упрощает работу и максимизирует эффективность.

На третьем уровне используется набирающая популярность резервируемая платформа фирмы Mitsubishi Electric MELSEC System Q, которая является отказоустойчивой и ресурсосберегающей системой. Целью использования систем автоматизации с резервированием является сокращение производственных потерь. При этом не имеет значения, вызваны ли эти потери неисправностью или являются результатом работ по обслуживанию. Платформа Mitsubishi Electric MELSEC System Q сконструирована резервируемой, так что она всегда остается готовой к действию при любых событиях. Это значит, что все существенные компоненты дублированы.

Резервированию подлежат центральные процессоры компании MELSEC System Q, которые представляют собой две идентичные системы, которые обеспечивают максимальную степень отказоустойчивости. В связи с этим степень готовности системы имитации невесомости невероятно повышается: при выходе из строя центрального процессора, сетевого блока или монтажной шины. Управление незамедлительно (в течение 21 мс) переключается на резервную систему, и процесс бесперебойно продолжается.

Достоинства использования резервируемой платформы Mitsubishi Electric MELSEC System Q:

– высокопроизводительный CPU, малое время переключения;

– резервирование по процессору, сетевым интерфейсам, источнику питания;

– модули, установленные на удаленном шасси, могут быть заменены без остановки и отключения системы;

– неограниченное количество ПИД-регуляторов (включая специализированные инструкции управления непрерывными процессами);

– система поддерживает все популярные открытые сети, включая Profibus, Melsecnet/H, CC-Link, Ethernet и т. д.;

– автоматический переход на работающую систему верхнего уровня (например SCADA) при обрыве одной из линий связи.

Также резервируется промышленная сеть Profibus DP, по которой происходит обмен данными с удаленными станциями ввода/вывода MELSEC STlite, каждая из которой оснащена двумя интерфейсными модулями (основным и резервным). Данное резервирование обеспечивает:

– безударное переключение на резерв (без внесения возмущений в управляемый процесс);

– высокую надежность всей системы;

– синхронизацию поступающих данных;

– малую длительность переключения.

Кроме того, резервируется источник питания, что позволяет увеличить коэффициент готовности программируемой платформы Mitsubishi Electric MELSEC System Q. Резервируемый источник питания обладает следующими свойствами:

– блок питания снабжен ограничителем тока включения;

– каждый из двух блоков питания может взять на себя обеспечение энергией всей стойки, если другой блок выходит из строя (работа системы не прерывается);

– каждый из двух блоков питания может быть заменен во время работы системы (при снятии и установке модулей не происходит ни исчезновения, ни возрастания полезного напряжения);

– каждый из двух блоков питания контролирует свои функции и посылает сообщение в случае своего выхода из строя;

– ни один из двух блоков питания не может выдать ошибку, которая бы повлияла на выходное напряжение другого блока питания.

Для конфигурирования и программирования платформы Mitsubishi Electric MELSEC System Q используется GX IEC Developer и MX OPC Server [5].

Четвертый уровень – уровень диспетчерского управления – представляет управление системой имитации невесомости через автоматизированное рабочее место оператора. Для организации обмена данными с промышленными компьютерами верхнего уровня платформа Mitsubishi Electric MELSEC System Q подключена в резервируемую сеть Ethernet, что также увеличивает отказоустойчивость всей системы.

Таким образом, многоуровневое управление и контроль системы имитации невесомости обеспечивает бесперебойную работу всей системы путем резервирования наиболее важных элементов, а также выполняет все функции управления и контроля параметров процесса как в автоматическом, так и ручном режиме.

Библиографические ссылки

1. Малые космические аппараты информационного обеспечения / под ред. В. Ф. Фатеева. М. : Радиотехника, 2010. 320 с.

2. Авиапанорама : междунар. авиационно-космический журнал [Электронный ресурс]. 2003–2004. URL: http://aviapanorama.su.

3. Удаленная станция ввода-вывода Mitsubishi Electric MELSEC STlite [Электронный ресурс]. URL: http://www.directindustry.com.

4. Платформа Mitsubishi Electric MELSEC System Q и ее компоненты [Электронный ресурс]. URL: http://www.mitsubishielectric.ru.

5. Программное обеспечение GX IEC Developer и MX OPC Server [Электронный ресурс]. URL: https://ru3a.mitsubishielectric.com.

References

1. Fateeva V. F. *Malye kosmicheskie apparaty informatsionnogo obespechenija* [Small spacecraft information provision, Ed. V. F. Fateev]. Moscow, Radiotehnika Publ., 2010, 320 p.

2. *Aviapanarama, Mezhdunarodnyj aviatsionno-kosmichekij zhurnal* [Aviapanorama, Intern. Aerospace Journal], 2003–2004, Available at: http://aviapanorama.su.

3. *Udalennaja stantsija vvoda. Mitsubishi Electric MELSEC STlite* [Remote station input output Mitsubishi Electric MELSEC STlite]. Available at: http://www.directindustry.com.

4. *Platforma Mitsubishi Electric MELSEC System Q i ee komponrenty* [Platform Mitsubishi Electric MELSEC System Q and its components]. Available at: http://www.mitsubishielectric.ru.

5. *Programmnoe obespechenie GX IEC Developer u MX OPC Server* [Software GX IEC Developer and MX OPC Server]. Available at: https://ru3a.mitsubishielectric.com.

© Ковалев И. В., Кикоть Ю. О., 2014