УДК 62-529

Решение задачи резервирования в станках с числовым программным управлением*

д.т.н. Г. М. Мартинов, к.т.н. Н. В. Козак, к.т.н. П. А. Никишечкин

// ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва. E-mail: kozak@ncsystems.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы резервирования функций электроавтоматики в системах числового программного управления (ЧПУ). Предложены механизмы резервирования функций электроавтоматики, исполнительных элементов и датчиков, повышающих надежность управления в системе ЧПУ. Представлена программная реализация для резервирования модулей ввода/вывода по принципам замещения и голосования в программно-реализованном ПЛК (программируемые логические контроллеры) системы ЧПУ АксиОМА Контрол. **Ключевые слова:** резервирование, ПЛК, обеспечение надежности, ЧПУ, подсистема голосования для дискретных входов, резервирование с замещением.

Abstract. The paper discusses problems of reserving functions of electroautomatics in CNC systems.The mechanisms of redundancy of functions of electroautomatic, actuators and sensors are proposed,to increase the reliability of control in the CNC system. The software implementation for reserving of I/O modules by the substitution and voting principles are presented with program-tools of the software-implemented PLC system of AxiOMA Control CNC. **Keywords:** redundancy, reserving, PLC, reliability assurance, CNC, voting subsystem for discrete inputs, redundancy with replacement.

Проблемы обеспечения надежности систем автоматизации

В металлообработке существуют задачи, в которых стоимость заготовки может исчисляться несколькими десятками тысяч рублей, а стоимость готовой детали — сотнями тысяч. Время обработки таких деталей может составлять до нескольких дней, а число технологических переходов и операций достигать нескольких сотен. Примером таких деталей могут быть лопатки паровых турбин электростанций и двигателей, большие корпусные детали и т. д. [1].

В процессе обработки сложных деталей возникают различные нештатные ситуации, связанные с поломкой инструмента или выходом из строя обрабатывающего оборудования. Такие ситуации приводят к дополнительным трудовым затратам и финансовым потерям. В случае поломки инструмента возможно получение брака, а при выходе из строя оборудования потери будут вызваны вынужденным простоем, поскольку поставка комплектующих и ремонт могут затянуться на несколько недель или месяцев [2 и 3].

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации Госзадания (№ 2.1237.2017/4.6) и проведена с использованием оборудования, предоставленного Центром коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

Резервируемые системы управления относят к отказоустойчивым, которые могут использоваться в процессах и задачах с повышенными требованиями к защите от производственных потерь, брака, требованиями непрерывности технологического процесса и др.

Резервирование — практически единственный и широко используемый метод повышения надежности ответственных систем автоматизации [4]. Оно позволяет создавать системы аварийной сигнализации, противоаварийной защиты, автоматического пожаротушения, контроля и управления взрывоопасными технологическими блоками, а также ответственные системы, в которых даже короткий простой ведет к большим финансовым потерям (например, системы генерации и распределения электроэнергии, управления непрерывными технологическими процессами, слежения за движущимися объектами и т. д.). Метод резервирования обеспечивает создание высоконадежных систем из типовых изделий широкого применения [5].

Резервирование в системах автоматизации классифицируют по ряду признаков, основные из которых: кратность резервирования (отношение числа резервных элементов к числу основных элементов устройства), состояние резервных элементов до момента включения их в работу, возможность совместной работы основных и резервных элементов с общей нагрузкой, способ их соединения.

При проектировании систем управления на основе электроавтоматики следует выделить уровни, на которых реализуют технологии резервирования (рис. 1).

Уровень управления — инструментарий и программные модули для создания алгоритмов управления с резервированием и расширенными функциями диагностики. Уровень автоматизации — программно-аппаратная платформа, на которой работает подсистема электроавтоматики и идет процесс управления в реальном времени. Уровень периферийных устройств — модули ввода/вывода, специализированные контроллеры, компоненты коммуникации (шлюзы, репитеры, преобразователи сигналов).Уровень исполнительных устройств — датчики, реле, приводы движения и другие устройства.

При рассмотрении типовых решений в реализации резервирования для задач автоматизации следует отметить необходимость разработки таких специализированных аппаратных решений (см. рис. 1), как ПЛК, модули

 ISSN 0869-7566

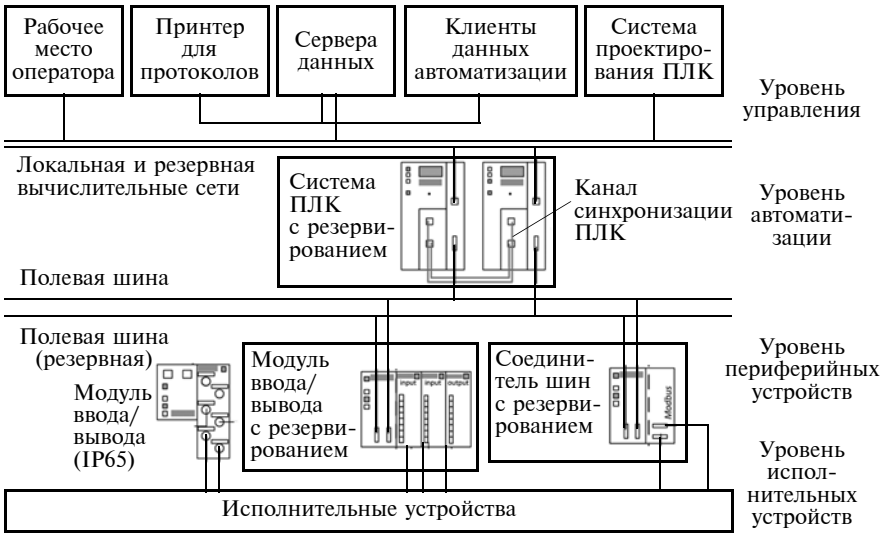

Рис. 1. Уровни системы автоматизации для задачи резервирования

ввода/вывода и модули коммуникации с функциями резервирования. Например S7-400H (Siemens) — резервируемая система [6], где идет дублирование центрального процессора (CPU), блока питания и аппаратуры для соединения обоих центральных процессоров. При этом происходит резервирование канала передачи данных как на верхнем уровне управления, так и на уровне децентрализованного управления исполнительными устройствами. Модули удаленного ввода/вывода и шинные соединители для исполнительных устройств (например, приводов управления двигателем) имеют возможность работы с резервной сетью обмена данными.

Наиболее полная структура резервирования для задач автоматизации включает в себя пару основного и резервного ПЛК, а так же пару модулей ввода/вывода (см. рис. 1). Работу ПЛК синхронизируют через специализированный канал связи. Эти две подсистемы образуют систему автоматизации, устойчивую к отказу, которая работает по принципу «активного резервирования». Для функционирования в такой структуре резервный ПЛК при подключении проходит процесс актуализации, при котором сравнивают версии встроенного программного обеспечения ПЛК (firmware) и их конфигурации и происходит копирование программ и данных из основного ПЛК. Также данная структура позволяет производить горячую замену (без прерывания управления технологическим процессом) вышедшего из строя контроллера.

Резервирование функций электроавтоматики для систем ЧПУ

При ответственных применениях систем ЧПУ, обеспечивающих непрерывность процесса управления, как следует из сказанного выше необходимо резервирование функций электроавтоматики. Например на сверх габаритных токарно-фрезерных центрах карусельной компоновки (с диаметром планшайбы до 5 метров) обработка одной крупной корпусной детали может занимать несколько дней. При этом подсистемы управления устройствами электроавтоматики должны обеспечивать бесперебойное выполнение вспомогательных операций.

В качестве примера возьмем станок мод. VMG50 (Станкостроительный завод имени Седина, г. Краснодар) [7]. Исходя из конструктивных особенностей мод. VMG50 выделены функции, для которых целесообразно применение систем, устойчивых к отказу. Эти функции показаны на рис. 2, а именно: *1* — руководство работой станции высокого давления масла для обеспечения зазоров в паре скольжения подшипников планшайбы; *2* — регулирование давления в парах скольжения направляющих осей станка [в частности *X*, *Z* и *W* (поперечина портала с установочными перемещениями)]; *3* — управление и контроль подачи СОЖ в зону обработки; *4* — контроль силовых реле в электрошкафах управления; *5* — диагностика процесса обработки, сбор данных датчиков температуры, вибрации, звуковой эмиссии и т. д.; *6* — выполнение технологических *M*-команд в процессе обработки.

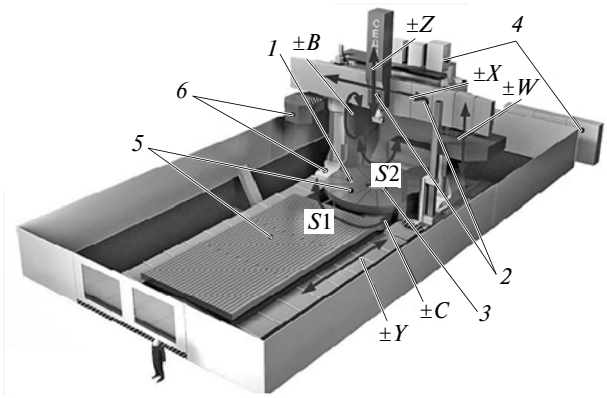

Рис. 2. Резервирование для функций управления станком мод. VMG50

В структуре подсистемы электроавтоматики необходимо выделение модулей, функции которых могут быть продублированы в резервных элементах. Также есть необходимость в высокой степени готовности резервирующих элементов, чтобы время их активации и «перехвата» управления было минимальным и удовлетворяло требованиям технологического процесса.

В структуре подсистемы электроавтоматики (в рамках интерфейса ЧПУ-ПЛК) отечественной системы ЧПУ

АксиОМА Контрол существуют следующие модули для резервирования [8]: модуль задачи коммуникации входов/выходов (I/O) для резервирования ввода/вывода; модуль коммуникации с ПЛК для резервирования управления на основе двух внешних ПЛК [9]; подсистема электроавтоматики в целом для резервирования подсистемы как внешнего клиента к ядру системы ЧПУ.

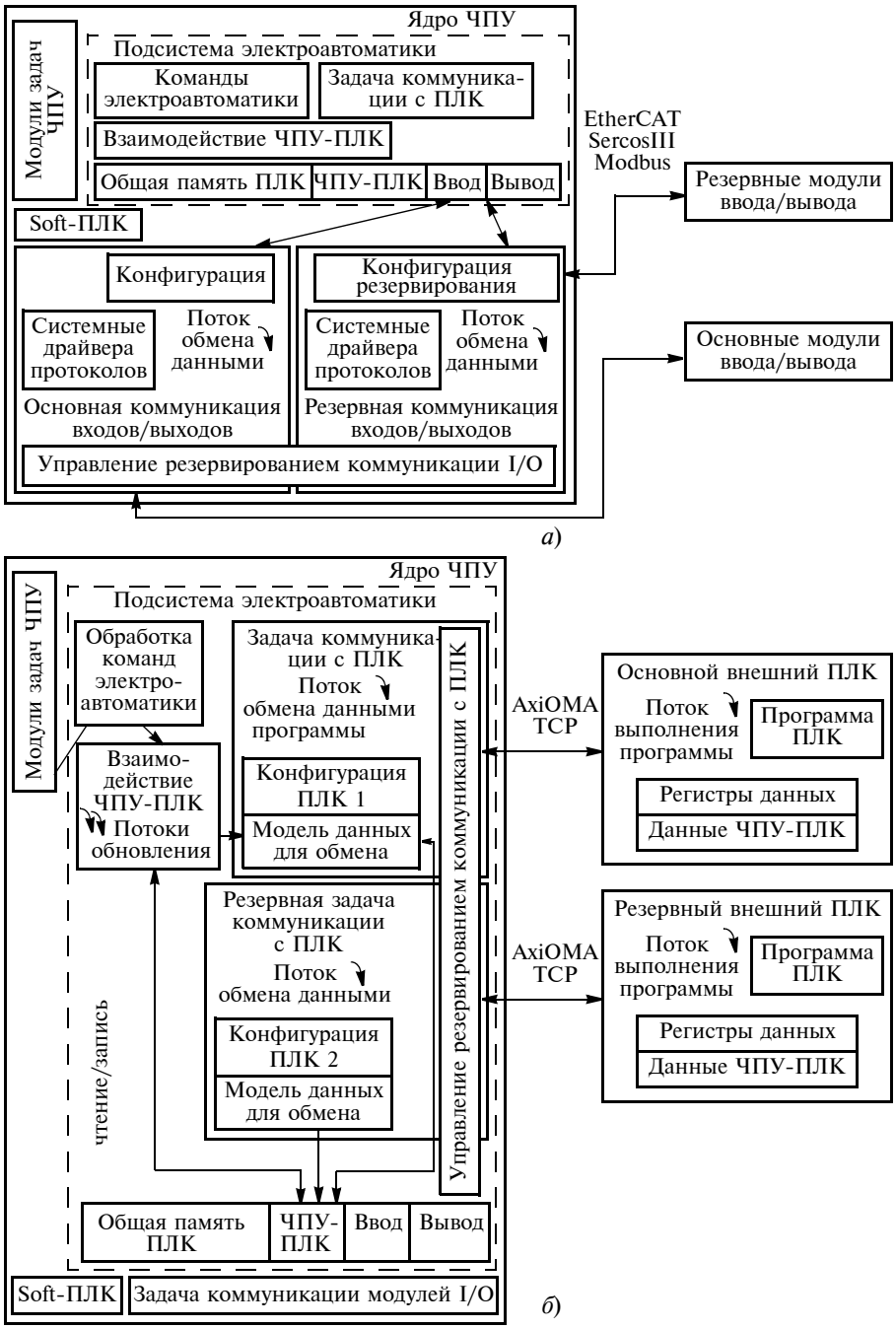

Рис. 3. Структуры резервирования модуля задачи коммуникации входов/выходов (*а*) и модуля «Задача коммуникации с ПЛК» (*б*)

Резервирование модуля коммуникации входов/выходов

Программа управления электроавтоматикой станка может быть реализована как на внешнем ПЛК, так и на внутреннем для ядра системы ЧПУ программно-реализованном контроллере (Soft-ПЛК) [10]. Применение внешнего ПЛК актуально для комплексных трудоемких задач управления электроавтоматикой. Связь с устройствами распределенного ввода/вывода для программно-реализованного контроллера выполняет модуль коммуникации входов/выходов. В пределах этого модуля работают системные драйверы промышленных протоколов (таких как EtherCAT, Sercos, Modbus) и происходит обращение к области данных ввода/вывода «Общей памяти ПЛК» (CommonPLCMemory) [10].

В структуру резервирования (рис. 3, *а*) входит основной и резервный модули задачи коммуникации I/O, которые функционируют с основными и резервными модулями ввода/вывода соответственно. Источником данных служит раздел общей памяти ПЛК, который содержит данные входов/выходов ПЛК. Для контроля состояния активности модулей и обработки диагностической информации в структуре выделен модуль управления резервированием. В такой структуре важную роль играют данные диагностики, предоставляемые аппаратными модулями ввода/вывода по промышленным протоколам. Например, если удаленные модули ввода/вывода сообщают, что есть ошибки в работе входов/выходов, перегрев, отсутствие связи с подчиненными устройствами и т. д., то принимается решение об активации резервной задачи коммуникации и резервных модулей ввода/вывода.

Резервирование управления электроавтоматикой станка

Для случая резервирования управления электроавтоматикой на основе внешнего ПЛК необходимо резервирование модуля коммуникации с ПЛК [11 и 12]. В рам-

ISSN 0869-7566

ках этой задачи доступ к данным интерфейса ЧПУ-ПЛК производят также через раздел «Общей памяти ПЛК» (рис. 3, *б*). Для подключения резервного ПЛК необходимы дополнительные данные конфигурации аппаратного обеспечения (например, IP-контроллер, порт, таймаут соединения и др.). Управление резервированием выполняет специализированный модуль на основе данных диагностики подключения ПЛК и его активности.

Внешний контроллер реализован как программно-реализованный ПЛК, вынесенный на независимую аппаратную систему [9].

Преимущества данного подхода.

1. Резервирование процесса управления электроавтоматикой основным и резервным ПЛК.

2. Возможность использования механизмов резервирования, заложенных во внешних ПЛК [6].

3. Возможность применения внешних контроллеров Soft-ПЛК и резервирования их работы на основе модуля управления резервированием в задаче коммуникации с ПЛК.

4. Возможность реализации прикладных (связанных с конкретной технологической задачей) команд управления резервированием в протоколе обмена ЧПУ-ПЛК.

Резервирование всей подсистемы электроавтоматики (т. е. функций модулей обработки команд, взаимодействия ЧПУ-ПЛК, общей памяти ПЛК) возможно вынести на аппаратную платформу по аналогии с внешними Soft-ПЛК [10]. При этом функция сетевого взаимодействия и протокола обмена командами должна быть перенесена в модуль обработки команд электроавтоматики. Такой дополнительный элемент в структуре системы позволит снизить вычислительную нагрузку на ядро системы ЧПУ, поскольку задачи работы с электроавтоматикой станка будут решаться на отдельном процессоре. Функции резервирования, например синхронизация программы ПЛК, конфигурации адресов в разделе «Общая память ПЛК» и модулей ввода/вывода, могут выполняться автоматически, что сократит возможные ошибки при настройке и пуско-наладке системы ЧПУ.

Резервирование исполнительных элементов и датчиков с помощью системы с голосованием

Для реализации систем с требованиями повышенной надежности технологии резервирования применяют и на объектах управления или тех объектах, с которых система получает информацию для работы.

Один из подходов резервирования в таком случае — построение так называемой системы с голосованием. Его принцип сведен к тому, что вместо одного элемента (например, датчика, концевого выключателя и т. д.), с помощью которого система осведомлена о работе или состоянии определенного узла, применяют несколько таких элементов.

Системе резервирования с голосованием присуща неспособность выделения в системе основных элементов и резервных, поскольку все они равноправны, работают одновременно и выполняют одну и ту же функцию. При этом система управления должна одновременно обрабатывать все сигналы и принимать решения на основе их анализа. Выбор одного сигнала из нескольких происходит посредством схемы голосования, которая в случае нечетного числа голосов называется мажоритарной.

Системы с голосованием не требуют контроля работоспособности элементов, но используют подсистему диагностики для сокращения времени восстановления отказавших элементов. Наличие подсистемы диагностики снижает вероятность накопления скрытых неисправностей, которые со временем могут стать причиной отказа.

Рассмотрим пример резервирования датчиков термопары,использующихся для контроля прогрева шпиндельного узла, определения температуры резания и температуры других узлов станка. Для реализации резервирования идет замена одного датчика тремя (или большим числом), все из которых подключены к модулям ввода контроллера. В контроллер электроавтоматики поступают три значения измеряемой величины, из которых необходимо выбрать одно. Например, рассмотрим подключение трех резервируемых термодатчиков к аналоговым модулям ввода (рис. 4, *а*).

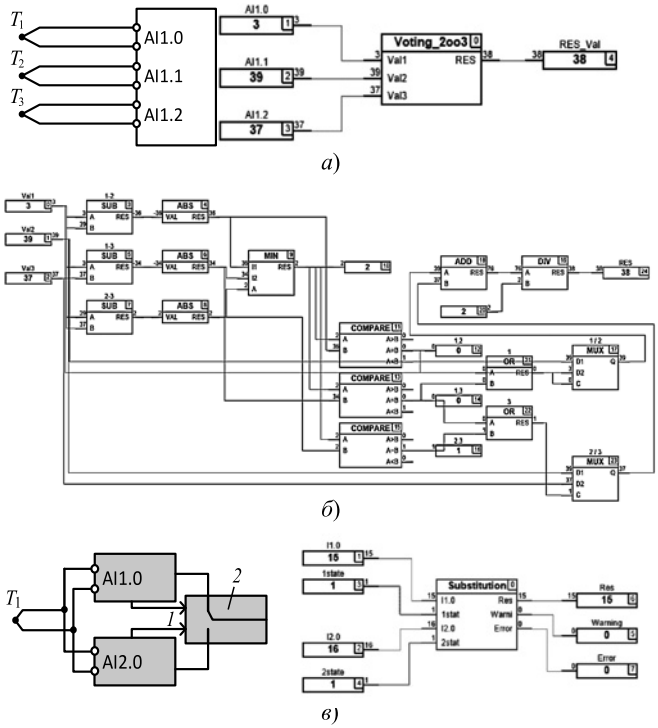

Рис. 4. Реализации резервирования с применением системы голосования для аналоговых входов (*а*) и библиотеки «Voting_2oo3» на языке FBD (*б*), а также схема резервирования с замещением модулей ввода: *1* — сигнал об отказе, *2* — блок переключения (*в*)

Система голосования в программе ПЛК реализована на языке FBD [12]. В данном случае голосование работает по принципу «2 из 3» (2 Out Of 3), когда на первом этапе система выбирает два более близких «голоса» из трех, а затем рассчитывает их среднее значение. Таким образом, на выход схемы голосования поступает значение, расположенное между двух ближайших входных значений.

Как видно из рисунка (рис. 4, *а*), система голосования игнорирует входное значение «3» и на выходе рассчитывает среднее из двух ближайших значений, а именно между 37 и 39. Для поддержания системы голосования «2 из 3» была создана библиотека «Voting_2oo3», которая реализует логику выбора ближайших значений и нахождения их среднего арифметического значения (рис. 4, *б*).

На вход библиотеки поступают три числа, из которых необходимо выбрать два ближайших по значению и рассчитать их среднее арифметическое. Для этого в библиотеке посредством использования арифметических блоков SUB (вычитание), ABS (модуль от числа), MIN (определение минимального значения), а также блока сравнения COMPARE система определяет два ближайших значения, т. е. такие значения, разность между которыми минимальна. В данном случае было установлено, что это 2-е и 3-е значения. Затем с помощью блока мультиплексора MUX система выбирает нужные значения и производится поиск среднего арифметического между ними. Так протекает процесс резервирования с системой голосования для аналоговых сигналов.

Резервирование модулей ввода/вывода по принципу замещения

Помимо рассмотренной системы резервирования с голосованием, при которой происходит дублирование исполнительных элементов и датчиков, распространена система с замещением. В отличие от системы с голосованием, в данной схеме есть подсистема контроля работоспособности как основного, так и резервного элементов и блок переключения на резерв. Переключение возможно как программным, так и аппаратным способом. Основным параметром систем с замещением служит время переключения на резерв. Переход на резерв выполняется в пределах одного или нескольких контроллерных циклов и занимает время от единиц миллисекунд до долей секунды.

На рис. 4, *в* представлен пример системы резервирования путем замещения на примере модулей ввода/вывода.

Система включает в себя основной (A/1.0) модуль и резервный (A/2.0), работоспособность которых подлежит контролю. Для этого используют такие параметры и события как например обрыв линии связи, короткое замыкание, величины напряжения и тока питания, отсутствие связи, ошибка памяти, «зависание» микропроцессора и т. п. Сигнал о работоспособности модуля идет далее: либо в аппаратный блок переключения, либо на другой вход контроллера, если переключение происходит программным способом.

До момента отказа на выход системы поступают данные только из основного модуля. Блок выбора постоянно контролирует состояние работоспособности модулей и после наступления отказа автоматически переключает выходной канал системы на исправный модуль.

Выводы

1. Конструктивные особенности станков, например крупногабаритных, предъявляют повышенные требования к надежности периферийного оборудования. Выход из строя подсистемы управления гидростанцией высокого давления на станке мод. VMG50 влечет поломку планшайбы, стоимость которой на порядок выше, применяемых на станке средств электроавтоматики. Резервирование подсистем и исполнительных устройств электроавтоматики на станочном оборудовании актуально в случае его использования во время изготовления обрабатываемых изделий высокой стоимости (крупногабаритных, сложных по конструкции, из труднообрабатываемых сплавов), когда сбой в процессе обработки может привести к браку.

2. Представленные методы повышения надежности подсистемы электроавтоматики ЧПУ реализуемы на основе резервирования трех подсистем: 1) модуля коммуникации с входами и выходами, 2) модуля коммуникации с ПЛК и 3) подсистемы электроавтоматики в целом (на внешней аппаратной платформе). Применимость упомянутых подходов зависит от структуры подсистемы электроавтоматики на конкретном оборудовании, в частности от наличия внешнего ПЛК по отношению к системе ЧПУ. В основе подходов лежит отказоустойчивая схема с двухканальной структурой (один из двух), которая работает по принципу «активного резервирования».

3. Рассмотренные системы резервирования подсистем электроавтоматики, датчиков по принципу голосования и резервирования модулей ввода/вывода по принципу замещения могут сочетаться и использоваться совместно. Это повышает надежность управляемой системы, но вместе с тем значительно увеличивает траты на ее производство, а также усложняет процесс ее изготовления.

Список литературы

1. **Martinov G. M., Kozak N. V.** Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMAcontol system // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35. — Is. 7. — P. 534—538.

2. **Grigoriev S. N., Martinov G. M.** The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems // Procedia CIRP. — 2016. — Vol. 41. — P. 858—863.

3. **Method** of decomposition and synthesis of the custom CNC systems / G. M. Martinov, N. V. Kozak, R. A. Nezhmetdinov et al. // Automation and Remote Control. — 2017. — Vol. 78. — Iss. 3. — P. 525—536.

4. **Raphael Fritz, Ping Zhang.** Overview of fault-tolerant control methods for discrete event systems, IFAC-PapersOnLine, 2018. — Is. 24. — Vol. 51. — P. 88—95.

5. **Martinova L., Martinov G. M.** Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. — Vladivostok, 2018. — P. 1—4.

6. **SIMATIC.** Система автоматизации S7-400 H. Отказоустойчивые системы. Руководство. Издание 07/2003. A5E00068197-07.

7. **Grigoriev S. N., Martinov G. M.** Decentralized CNC automation system for large machine tools. Proc. of COMA 13/ International Conference on Competitive Manufacturing. — Stellenbosch (South Africa). — 2013. — P. 295—300.

8. **Nezhmetdinov R. A., Nikishechkin P. A., Nikich A. N.** Approach to the Construction of Logical Control Systems for Technological Equipment for the Implementation of Industry 4.0 Concept // In: 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — Sochi: IEEE.

9. **Kovalev I. A., Nezhmetdinov RA., Nikishechkin P. A.** Approach to Assessing the Possibility of Functioning of CNC and PAC Systems on Various Software and Hardware Platforms. In: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — Vladivostok: IEEE, 2019. — P. 1—5.

10. **Martinov G. M., Kozak N. V., Nezhmetdinov R. A.** Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. — P. 1—4. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076119.

11. **Kovalev I. A., Nikishechkin P. A., Grigoriev A. S.** Approach to Programmable Controller Building by its Main Modules Synthesizing Based on Requirements Specification for Industrial Automation // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — 2017. — P. 1—4.

12. **Nikishechkin P. A., Chervonnova N., Nikich A. N.** Approach to the construction of specialized portable terminals for monitoring and controlling technological equipment. In: MATEC Web Conf // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). — Sevastopol, Russia. — 2018. — Vol. 224. — P. 1—9.

Поступила в редакцию 19.03.2020; после доработки 19.03.2020; принята к публикации 19.03.2020.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 55.01.75

Анализ подходов к решению задач управления стоимостью в системе управления жизненным циклом самолета

к.э.н. М. М. Гязова, д.т.н. М. В. Силуянова, Д. А. Бондаренко, К. В. Токарев

// Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), РФ, г. Москва.

E-mail: mgyazova@gmail.com, dc2mati@yandex.ru, aflisun2015@gmail.com, kvtokarev@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена управлению стоимостью в системе управления жизненным циклом (ЖЦ) самолета. В теоретическом анализе авторы статьи рассматривают составляющие управления стоимостью, основные автоматизированные системы, используемые в современном интегрированном информационном пространстве, и универсальную схему применения автоматизированных систем на разных этапах жизненного цикла изделия для решения, в том числе, задач эффективного управления стоимостью. Исследовательская часть статьи строится на построении схемы управления производственной себестоимостью, а также формировании архитектуры системы управления жизненным циклом самолета, что позволяет решать задачи управления стоимостью, в том числе на этапе эксплуатации самолета. **Ключевые слова:** управление стоимостью в системе управления жизненным циклом самолета, проектирование под заданную стоимость, архитектура системы управления жизненным циклом самолета, снижение стоимости жизненного цикла на этапе эксплуатации самолета, анализа логистической поддержки, сервис-ориентированный подход с применением эффективных инструментов управления стоимостью самолета.

Abstract. The article is devoted to the issue of cost management in the aircraft life cycle management system. In a theoretical analysis, the authors of the article consider the main components of cost management, the main automated systems used in the modern integrated information space and the universal scheme of using automated systems at different stages of the product life cycle for solving problems of effective cost management. The research part of the article is based on the construction of a production cost management scheme, as well as the formation of the architecture of the aircraft life cycle management system, which makes it possible to solve cost management tasks, including during the phase of operating an aircraft. **Keywords:** cost management in the aircraft life cycle management system, design for a given cost, architecture of the aircraft life cycle management system, reduction in the life cycle cost during the phase of operating an aircraft, analyzing logistics support, service-oriented approach with the use of effective tools of aircraft cost management.

Одним из востребованных инструментов, используемых для описания процесса развития любой экономической системы, служит модель ЖЦ изделия, поскольку эффективное управление развитием компании на основе такой модели дает возможность вырабатывать оптимальные направления необходимых преобразований. В большинстве случаев практическое применение модели ЖЦ носит фрагментарный характер. Отсутствие возможности определения длительности различных стадий жизненного цикла и всего жизненного цикла в целом не позволяет однозначно идентифицировать этапы ЖЦ и в качестве критерия оценки определить стоимость всего ЖЦ, а не отдельные показатели эффективности.

Таким образом, необходима надежная система управления ЖЦ, которая будет способствовать повышению конкурентоспособности и обеспечит рентабельность проекта создания самолета посредством решения последовательных задач управления стоимостью.